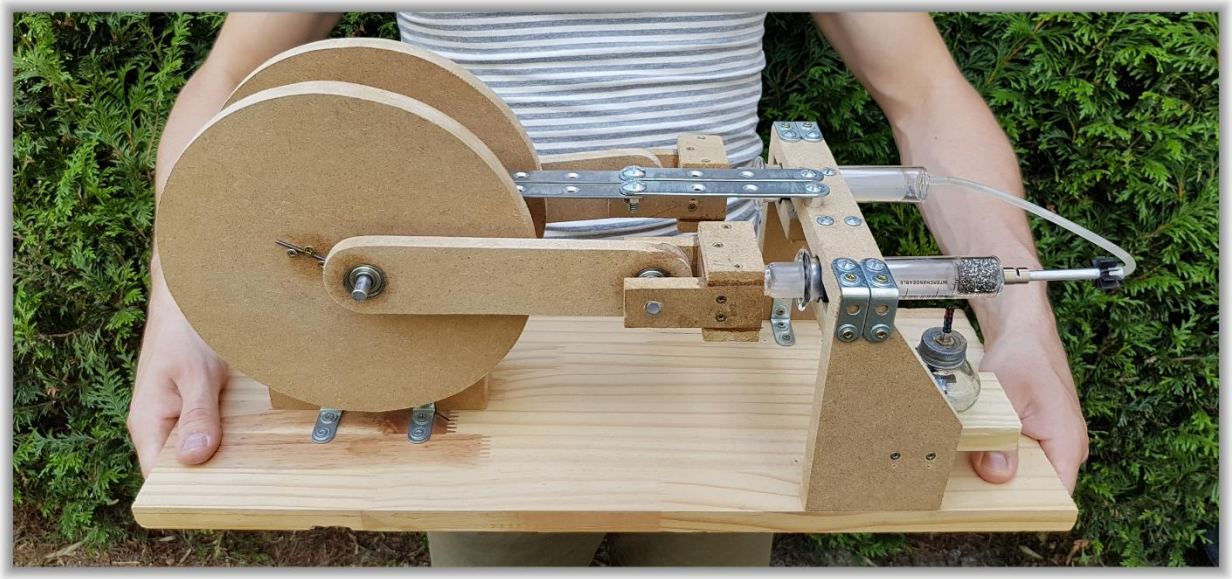
Fabriquer un moteur Stirling



Dimensionnement et fabrication d'un moteur Stirling de type alpha

Incroyables Expériences
Armand & Victor

Sommaire

Préambule 2
Introduction 3
I) À la découverte du moteur Stirling 4
1) Histoire 4
2) Principe de fonctionnement 6
a) Approche intuitive 6
b) Cycle thermodynamique théorique 7
c) Types de moteurs Stirling 10
3) Applications industrielles 11
a) Avantages et inconvénients 11
b) Utilisations industrielles 12
c) Application à l'énergie solaire 14
II) Dimensionnement et fabrication d'un moteur Stirling 16
1) Dimensionnement du moteur 16
a) Choix du type de moteur 16
b) Sources de chaleur 16
c) Cycle réel 21
d) Estimation de la perte de charge du tuyau 27
e) Dimensionnement du volant d'inertie 29
2) Fabrication du moteur 31
a) Résistance des seringues 31
b) Constructions préliminaires 33
c) Choix des matériaux 36
d) Détail des parties du moteur 37
III) Essais et analyses **41**
1) Le moteur Stirling en fonctionnement 41
a) Premier essai fonctionnel 41
b) Importance de la qualité des seringues 42
2) Puissance et rendements 43
a) Détermination de la puissance du moteur 43
b) Rendements 46
Conclusion **49**

Préambule

Ce document est associé à la vidéo « Fabriquer un moteur Stirling » de la chaîne YouTube « Incroyables Expériences » et a été réalisé par Armand & Victor. Il a pour objectif de fournir des informations complémentaires pour les plus curieux qui souhaitent approfondir le sujet, notamment en ce qui concerne la théorie.

Ce document a été relu et validé par des enseignants-chercheurs en physique mais cela n'exclut pas qu'il y ait des erreurs ou des imprécisions. Nous ne garantissons donc pas l'exactitude des informations et des démarches présentées.

Les informations et figures qui apparaissent dans ce document peuvent être utilisées dans le cadre des loisirs ou des études par ceux qui le souhaitent. Si vous êtes étudiant et faites un projet sur le moteur Stirling, variez les sources et ne plagiez pas, chacun a sa propre façon de comprendre et d'expliquer.

Notre projet de moteur Stirling de type alpha a commencé en 2015 et s'est terminé en 2018. Sachant que nous avons réalisé la partie théorique au début du projet, en 2015, et que la vidéo est sortie en 2018, il y a des différences au niveau du moteur et des informations techniques entre ce document et la vidéo. Ce document n'aborde pas l'utilité de la paille de fer ainsi que les tests fonctionnels avec la lentille de Fresnel.

Bonne lecture à tous !

Introduction

Le moteur Stirling est un moteur thermique qui utilise un gaz en circuit fermé pour fonctionner. Dans les versions les plus courantes de ce moteur, ce gaz n'est autre que de l'air. Le principe de fonctionnement du moteur Stirling est assez simple mais son rendement peut dépasser les 40 % ce qui est très bon pour une conversion de chaleur en travail.

La particularité du moteur Stirling comparé aux moteurs thermiques de voitures est que c'est un moteur dit à combustion externe ce qui implique qu'il peut fonctionner avec n'importe quelle source de chaleur ou de froid. On peut le faire fonctionner aussi bien avec des hydrocarbures, du bois, des biocarburants et même de l'azote liquide. Ce moteur est également parfaitement compatible avec un four solaire dont la source de chaleur à haute température est propice à l'obtention d'un bon rendement. C'est d'ailleurs en combinant un moteur Stirling avec un four solaire que l'on obtient les meilleurs rendements de conversion de rayonnement solaire en travail.

L'objectif de ce document est de vous aider à dimensionner puis fabriquer un moteur Stirling de type α capable de fonctionner à l'énergie solaire. Nous allons commencer par présenter le moteur Stirling en abordant son histoire, son principe de fonctionnement puis ses applications industrielles. Nous allons ensuite vous expliquer comment nous avons dimensionné notre moteur et quelles ont été les étapes de sa fabrication. Pour finir, nous commenterons les essais et analyserons les performances du moteur.

I) À la découverte du moteur Stirling

1) Histoire

Le moteur Stirling a été inventé par Robert Stirling en 1816. A cette époque, les moteurs utilisés étaient des moteurs à vapeur dont les chaudières présentaient des risques d'explosion. Robert Stirling a alors conçu un moteur à combustion externe qui utilise de l'air sous des pressions relativement faibles et non de la vapeur d'eau pour fonctionner.

En 1843, avec son frère James Stirling, il matérialise son moteur dans une fonderie. Malgré tous ses efforts, le moteur développait une puissance massique trop faible par rapport à la machine à vapeur. Par ailleurs, le moteur doit être exposé à des températures élevées pour obtenir une bonne efficacité or les matériaux disponibles à l'époque se détérioraient rapidement sous l'effet des hautes températures. Le moteur de Stirling ne pouvant rivaliser avec les autres types de moteurs, il ne sera utilisé que de façon marginale pour des applications de faible puissance (*figure 1*).

Figure 1 : l'une des premières réalisations de moteur Stirling

Ce n'est qu'en 1871, 55 ans après l'invention du moteur, que l'ingénieur Gustav Schmidt décrit mathématiquement le cycle de Stirling, les progrès en thermodynamique sont considérables à la fin du XIXème siècle.

Dans les années 1930, les études du moteur Stirling reprennent. La société néerlandaise Philips décide d'étudier son application dans plusieurs domaines. En 1938, la société réalise un moteur Stirling de plus de 200 chevaux avec un rendement supérieur à 30% mais cette technologie ne trouve d'application qu'en cryogénie (le moteur, qui est inversible, est entrainé par un moteur électrique et est utilisé comme pompe à chaleur pour produire du froid).

En 1951, toujours par Philips, un moteur Stirling de 180 W est développé pour être utilisé comme groupe électrogène (*figure 2*). Comme la réalisation de ce moteur ne pouvait se faire à un prix compétitif, seulement 150 ont été construits. Un groupe électrogène actuel des mêmes dimensions, muni d'un moteur à quatre temps, développe une puissance environ cinq fois plus élevée. Par la suite, Philips a également tenté d'équiper une voiture d'un moteur Stirling, mais cette tentative fut infructueuse en raison de la trop grande inertie thermique du moteur.

Figure 2 : groupe électrogène à moteur Stirling de 180 W développé par Philips dans les années 1950

En 1996, la marine Suisse utilise un moteur Stirling pour propulser et recharger les batteries de ses sous-marins lorsqu'ils sont sous l'eau. Ces moteurs ont la particularité d'être silencieux, ce qui est primordial pour un sous-marin. Ces améliorations ont été permises grâce à l'utilisation de matériaux qui supportent de forts gradients de température.

De nos jours, le moteur de Stirling présente en regain d'intérêt car il peut être combiné à l'énergie solaire. L'association d'un concentrateur solaire à un moteur Stirling (entrainant un générateur) peut en effet engendrer un rendement supérieur aux cellules photovoltaïques mais cela reste une technologie onéreuse, notamment parce que le concentrateur solaire doit nécessairement suivre la course du soleil. En 2008, grâce à cette technologie, le taux de

conversion record d'énergie solaire en travail est atteint : 31,25%. Le moteur Stirling continue ainsi d'être développé par des entreprises spécialisées mais également par la NASA.

2) Principe de fonctionnement

a) Approche intuitive

L'objectif de cette partie est de comprendre comment fonctionne un moteur Stirling de manière intuitive, sans avoir recours à des calculs.

Le moteur Stirling, comme tout moteur thermique, utilise un fluide pour fonctionner, dans notre cas de l'air. Le principe physique à l'origine du moteur Stirling c'est le lien entre la température d'un gaz et le volume qu'il occupe, en effet, un certain volume d'air occupe plus de place une fois chauffé. Pour illustrer ce phénomène, nous avons utilisé un récipient de volume constant comme on peut le voir sur la *figure 3*. Le récipient est fermé hermétiquement par un opercule en plastique. Sur l'image de gauche, le récipient trempe dans de l'eau à température ambiante. On remarque que l'opercule se trouve aligné avec le niveau du récipient. Sur l'image de droite, le même récipient trempe dans de l'eau bouillante. Lorsque le récipient est chauffé par l'eau, la température de l'air qu'il contient s'élève, l'air prend donc plus de place ce qui a pour effet d'augmenter la pression et bombe l'opercule. Comme l'opercule se déplace en « repoussant la pression atmosphérique », il y a bien du travail produit à partir de chaleur.

Figure 3 : la dilatation de l'air avec la température bombe l'opercule

Pour revenir à l'état initial il ne suffit que de remettre le récipient dans l'eau froide. A ce moment-là, l'air refroidit et l'opercule redescend.

Le moteur Stirling fonctionne sur le même principe, on chauffe de l'air qui se dilate ce qui a pour effet de pousser un piston moteur. On refroidit ensuite l'air ce qui ramène le piston

moteur. Plutôt que de chauffer et refroidir alternativement la même zone, ce qui fait perdre beaucoup d'énergie à cause de l'inertie thermique des parois, on chauffe et refroidit deux zones différentes et on se contente de déplacer l'air d'une zone à l'autre. Pour ce faire, on utilise un piston déplaceur qui est mis en mouvement par le piston moteur. Le piston déplaceur a seulement besoin de la puissance nécessaire pour compenser les divers frottements qu'il engendre.

Ce cycle peut se reproduire des dizaines de fois par seconde et on obtient alors un moteur.

b) Cycle thermodynamique théorique

Le cycle thermodynamique d'un moteur thermique est un diagramme qui représente l'évolution du volume et de la pression du fluide utilisé pour produire du travail, c'est-à-dire du mouvement utile. A chaque fois qu'un cycle est réalisé, de la chaleur est transférée de la source chaude à la source froide et une partie est transformée en travail. L'étude du cycle thermodynamique d'un moteur permet de prédire son rendement mais également d'avoir conscience des points permettant de l'améliorer ainsi que de difficultés potentielles pour le mettre en œuvre.

Le cycle thermodynamique théorique du moteur Stirling comprend quatre phases différentes. Une compression, un échauffement, une détente et un refroidissement (*figure 4*). Ce cycle est un cycle fermé car le fluide de travail n'est pas renouvelé. Ce cycle est inversible ce qui permet de faire fonctionner le moteur Stirling en pompe à chaleur lorsqu'on lui fournit du travail.

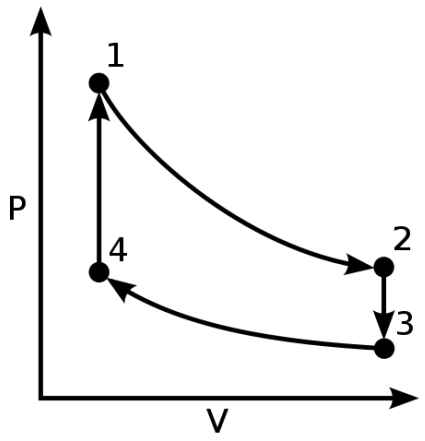


Figure 4 : diagramme de la pression en fonction du volume d'un cycle théorique de Stirling

• Entre les points 3 et 4 le gaz subit une compression isotherme, il est comprimé mais il ne chauffe pas car il évacue en même temps la chaleur liée à la compression vers le milieu extérieur. Cette opération consomme du travail.

• Entre les points 4 et 1 le gaz subit un échauffement isochore, le gaz est placé devant une source chaude et sa température augmente alors que son volume est fixé.

• Entre les points 1 et 2 le gaz subit une détente isotherme, celui-ci est absorbe de la chaleur à la source froide et son volume augmente. Il s'agit du temps moteur qui récupère du travail.

• Entre les points 2 et 3 le gaz subit un refroidissement isochore où il est refroidi par la source froide alors que son volume est maintenu constant.

La suite ne sera compréhensible que pour ceux qui ont déjà étudié ou souhaitent étudier la thermodynamique.

Calculons la chaleur Q_1 absorbée entre les points 4 et 1 lors du réchauffement isochore :

$$Q_1(4 \rightarrow 1) = n.Cv.(T_c - T_f)$$

De la même façon, entre les points 2 et 3 :

$$Q_2(2 \rightarrow 3) = n.Cv..(T_f - T_c)$$

Notons la chaleur échangée entre les points 1 et 2, $Q_c(1 \rightarrow 2)$. D'après le premier principe de la thermodynamique, on a $dU = \delta Q_{ext} + \delta W_{ext}$ (U est l'énergie interne et W est le travail) or la transformation est isotherme donc $dU = 0$. Finalement :

$$\delta Q_c = -\delta W_{ext} = -P.dV$$

$$\leftrightarrow \delta Q_c = -n.R.T_c.\int_{V_{max}}^{V_{max}} \frac{dV}{V}$$

$$\leftrightarrow Qc = -n.R.T_c.\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)$$

On raisonne de la même façon pour les points 3 et 4 du côté froid, on obtient finalement :

$$Q_f(3 \rightarrow 4) = n.R.T_f.\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)$$

On peut alors repérer ces différents échanges de chaleur sur le cycle (*figure 5*) :

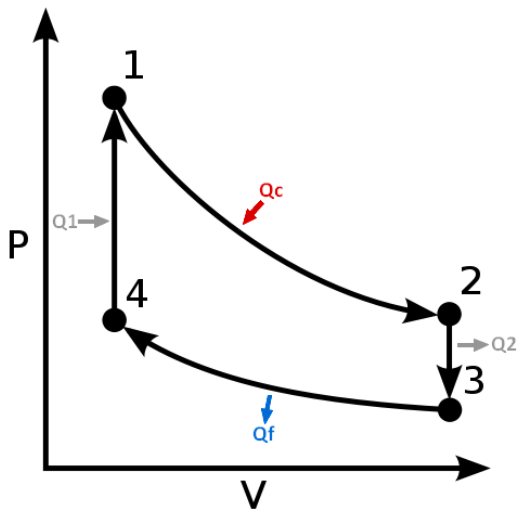


Figure 5 : chaleurs représentées sur les transformations théoriques

En somme, nous avons : $W = Q_1 + Q_c + Q_2 + Q_f$

$$\leftrightarrow W = n.Cv.(T_c - T_f) - n.R.T_c.\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) + n.Cv.(T_f - T_c) + n.R.T_f.\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)$$

$$\leftrightarrow W = n.R.\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right).(T_f - T_c) < 0 \; car \; fourni \; vers \; l'extérieur$$

$$|W| = n.R.\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right).(T_c - T_f)$$

On peut maintenant calculer le rendement du cycle de Stirling :

$$\eta = \frac{W}{Q_{source\ chaude}} = \frac{W}{Q_c + Q_1} = \frac{n.R.\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right).(T_c - T_f)}{n.Cv.(T_c - T_f) + n.R.T_c.\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)}$$

$$\leftrightarrow \eta = \frac{R.\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right).(T_c - T_f)}{Cv.(T_c - T_f) + R.Tc.\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)}$$

Avec $R = 8{,}314$, la constante des gaz parfaits et $Cv = \frac{3}{2}.n.R$, la capacité calorifique de l'air à volume constant. Le rendement obtenu est inférieur à celui du cycle de Carnot mais peut être

augmenté à l'aide d'un régénérateur qui permet d'emmagasiner la chaleur lors du refroidissement isochore (Q_2) pour la restituer lors du chauffage isochore (Q_1).

Avec un régénérateur, on a $Q1_{consommée} = 0$ (Car elle provient de Q_2) on obtient ainsi :

$$\eta = \frac{R.\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right).(T_c - T_f)}{R.Tc.\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)} = \frac{(T_c - T_f)}{T_c}$$

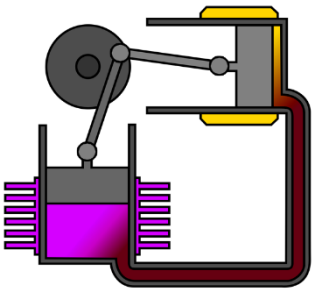
$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

En présence d'un régénérateur, le cycle thermodynamique théorique d'un moteur Stirling idéal est identique à celui d'une machine Carnot dont le rendement est le plus élevé possible. Le moteur Stirling avec régénérateur est donc « sur le papier », le meilleur moteur qui soit.

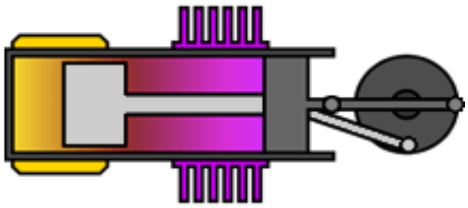
c) Types de moteur Stirling

Il existe différents types de moteurs Stirling, les moteurs Stirling de type α, β et γ (*figure 6*).

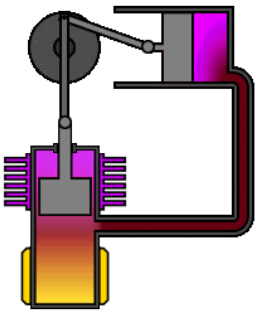
Figure 6 : moteurs Stirling analogues de type α, β et γ



- Le moteur Stirling de type α est composé de deux pistons, un piston chaud et un piston froid reliés par une conduite. Le piston froid a un retard de 90° par rapport au piston chaud. Le gaz est tout d'abord chauffé dans le cylindre chaud, son volume augmente ce qui fournit du travail. Le gaz est ensuite envoyé dans le cylindre froid ce qui diminue sa température et donc son volume. Le piston froid redescend alors et le gaz atteint son volume minimum avant de retourner dans le cylindre chaud pour se réchauffer à nouveau. C'est le type de moteur le plus efficace, cela s'explique surtout par son taux de compression élevé.



• Le moteur Stirling de type β utilise un volume de gaz qui se situe entre deux pistons situés dans le même cylindre. L'un des pistons n'est pas étanche, il sert de déplaceur. Ce déplaceur transfert le gaz du côté de la source chaude ou froide. Les sources chaudes et froides sont situées de part et d'autre du cylindre. Ce moteur a pour avantage d'être compact et il génère peu de pertes liées au déplacement du gaz. En revanche, son inconvénient majeur provient des pertes par conduction directe entre les sources chaudes et froides.



• Le moteur Stirling de type γ est constitué d'un piston déplaceur et d'un piston moteur. Le piston déplaceur met le gaz en contact entre la zone chaude et froide ce qui fait varier la température du gaz. Le moteur γ fonctionne avec le même principe que le moteur β mais le piston moteur est séparé du piston déplaceur. Le défaut de ce moteur est que le volume déplacé du piston moteur est plus petit que celui du piston déplaceur, ce qui génère un volume « mort » élevé. Cela limite le taux de compression et donc le rendement du moteur. Ce moteur est en revanche très simple et certaines versions peuvent tourner avec une très faible différence de température.

3) Applications industrielles

a) Avantages et inconvénients

Avantages

Le moteur Stirling présente de nombreux avantages. C'est d'abord un moteur silencieux car comme il fonctionne en cycle fermé, il n'y a pas phase « d'échappement » bruyante.

La combustion étant externe, il est plus facile de la contrôler et d'avoir une combustion complète des carburants avec peu de polluants. Il est également possible d'utiliser n'importe quel carburant ou source de chaleur (combustion de gaz, de bois ou énergie solaire).

Le moteur Stirling nécessite peu d'entretien car le fluide de travail est toujours le même et il n'y a pas d'impuretés qui s'y introduisent. Il n'y a également pas de réaction chimique interne

qui pourrait détériorer les pistons. Le rendement du moteur peut atteindre 40 % ce qui est plus élevé que certains moteurs à combustion interne.

Enfin, le moteur Stirling est inversible ce qui permet de l'utiliser comme pompe à chaleur. On peut ainsi donc produire des températures de l'ordre de -200 °C.

Inconvénients

Le principal inconvénient du moteur Stirling est que pour obtenir un bon rendement, il doit pouvoir supporter des températures très élevées. Dans un moteur à combustion interne, la température pendant la phase de combustion atteint 2000 °C mais cette température est maintenue pendant un temps très court ce qui permet aux parois la supporter. *A contrario*, dans un moteur Stirling, la paroi de la source chaude est la partie la plus chaude du moteur et doit supporter une température élevée en permanence tout en restant étanche. Pour des raisons de faisabilité, les moteurs Stirling industriels ont donc des sources chaudes à des températures inférieures ce qui impacte fortement leur rendement.

La densité de puissance d'un moteur Stirling est également plus faible que celle des moteurs à combustion interne en raison de leur faible taux de compression et du transfert thermique relativement lent entre les parois et le fluide. Pour maximiser la densité de puissance et le rendement d'un moteur Stirling, un fluide de forte capacité calorifique et sous pression comme de l'hélium est utilisé. La faible viscosité de l'hélium permet aussi de réduire les frottements lors de ses déplacements dans le moteur ce qui augmente le rendement.

Le moteur Stirling souffre aussi d'une forte inertie thermique. En effet, la température de la source chaude ne peut pas varier immédiatement ce qui rend le moteur Stirling incompatible avec un accélérateur et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé dans l'automobile. Il pourrait cependant le devenir avec une hybridation électrique.

b) Utilisations industrielles

Le moteur Stirling a de nombreuses applications industrielles bien que son utilisation reste marginale. Il est principalement utilisé comme pompe à chaleur dans le domaine de la réfrigération industrielle et militaire. L'utilisation du moteur en tant que refroidisseur est simple et efficace (*figure 7*), cela permet de produire du froid à très faible température pour liquéfier de l'air.

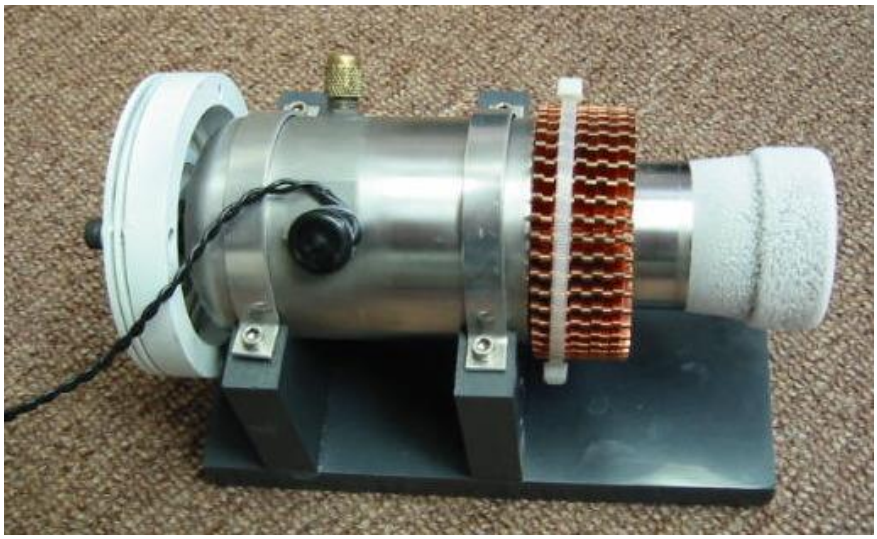


Figure 7 : moteur Stirling de réfrigération, la tête froide est recouverte de givre

Son utilisation dans le domaine militaire permet de servir de refroidisseur pour les systèmes de guidage militaire infrarouge.

Le moteur Stirling est aussi utilisé comme générateur électrique dans les milieux extrêmes (désert ou pôles) par des nombreuses missions scientifiques et militaires.

La NASA l'utilise pour fournir de l'énergie aux satellites et sondes spatiales (tout comme la thermoélectricité). Le rendement est élevé car il y a une grande différence de température, la source chaude étant constituée d'éléments radioactifs à longue demi-vie.

Pour l'anecdote, le société MSI a réalisé en 2008 un système de refroidissement pour ordinateur où le ventilateur est actionné par un moteur Stirling dont la source chaude est le processeur à refroidir (*figure 8*).

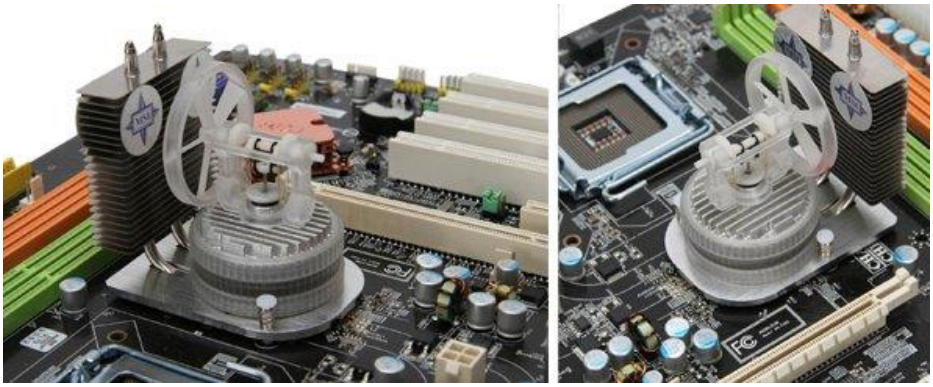


Figure 8 : une application du moteur Stirling par MSI

Certains constructeurs de chaudières proposent depuis les années 2010 des chaudières à gaz à micro-cogénération utilisant un moteur Stirling. Le moteur Stirling intégré a un rendement de seulement 15 % mais toute la chaleur résiduelle est utilisée pour chauffer de l'eau, le

rendement global atteint alors presque 100 %. Ces chaudières sont économiquement intéressantes car le prix d'un kWh l'électricité est plus élevé que celui d'un kWh de gaz. Ainsi, les 15 % d'électricité produite sont plus intéressants que ces mêmes 15 % s'ils étaient de la chaleur.

Le moteur de Stirling est enfin utilisé à des fins pédagogiques pour illustrer les principes de la thermodynamique. Certains peuvent fonctionner avec la chaleur dégagée par la paume d'une main, d'autres avec le froid produit par l'évaporation de l'eau (*figure 9*).

Figure 9 : moteur Stirling fonctionnant grâce à l'enthalpie de vaporisation de l'eau par temps sec (source froide)

c) Applications à l'énergie solaire

Le moteur Stirling peut utiliser l'énergie solaire comme source chaude. Le rayonnement solaire peut être récupéré de deux manières différentes, soit par des capteurs cylindro-paraboliques soit par des paraboles.

Dans un capteur cylindro-parabolique, un tube est placé au foyer du capteur. Un fluide circule à l'intérieur et est progressivement chauffé à haute température. Ce fluide peut alors communiquer sa chaleur au piston chaud d'un moteur Stirling. Le fluide est chauffé à une température voisine de 400°C permettant d'avoir un rendement correct. Le principal avantage de ce type d'installation est qu'elle peut fonctionner en continu car fluide chauffé par soleil le jour peut être stocké et utilisé de nuit.

L'utilisation d'une parabole est plus répandue. La source chaude du moteur est placée au foyer de la parabole où converge la totalité des rayons du soleil. Un tel dispositif doit cependant impérativement suivre le soleil de son levé à son couché pour que les rayons focalisent au niveau du foyer. La température que l'on peut obtenir est plus importante qu'avec un capteur cylindro-parabolique et peut dépasser les 1000 °C. Le rendement que l'on peut espérer obtenir avec le moteur Stirling est donc plus élevé d'après le second principe de la thermodynamique.

Les surfaces réfléchissantes qui équipent les paraboles peuvent être constituées de différents matériaux. Les plus répandues sont des plaques de verre avec un dépôt d'argent ou d'aluminium, à la manière d'un miroir classique. Cette méthode offre un taux de réflexion supérieur à 95 %. Il est également possible d'utiliser un film plastique flexible à moindre coût pour remplacer le verre. Sa durée de vie est en revanche limitée en raison des rayons ultraviolets. Une feuille d'aluminium polie peut également être utilisée. Cette alternative est moins chère mais son taux de réflexion se limite à 85 %.

Des applications industrielles du Stirling solaire ont été expérimentées comme la centrale de Maricopa dans l'Arizona qui a fonctionné de 2010 à 2011 (*figure 10*). Cette centrale comportait un ensemble de 60 paraboles d'un diamètre de 12 m, chacune reliée à un moteur Stirling. Chacun des moteurs pouvait fournir une puissance de 25 kW pour un total de 1,5 MW[8]. Contrairement à une centrale thermique ordinaire, cette centrale n'utilisait pas d'eau pour son refroidissement mais l'air au niveau de chaque moteur ce qui a permis son implantation dans un désert. Le coût d'une telle centrale est cependant plus élevé que celui d'une centrale solaire photovoltaïque de puissance égale, même si l'on prend en compte le rendement accru du Stirling solaire.

Figure 10 : centrale solaire à moteur Stirling de Maricopa dans l'Arizona qui a fonctionné de 2010 à 2011

II) Dimensionnement et fabrication d'un moteur Stirling

1) Dimensionnement

a) Choix du type de moteur

Nous avons vu précédemment qu'il existe trois types de moteur Stirling, les moteurs dits α, β et γ. Les moteurs les plus simples à construire sont les moteurs γ car ils ne comportent qu'un seul piston étanche et ils peuvent fonctionner avec de faibles différences de pression. En revanche, les moteurs γ ont un rendement limité bien qu'ils puissent tourner à partir de faibles différences de température. Les moteurs Stirling de type β sont les plus complexes à réaliser mécaniquement car ce sont des moteurs γ où les pistons moteur et déplaceur se situent dans le même cylindre. Seuls les moteurs Stirling de type α permettent d'obtenir des rendements intéressants tout en restant relativement simples à fabriquer.

Ce qui est le plus difficile à réaliser avec le moteur α, c'est deux couples piston et cylindre identiques, étanches, et capables de résister à des pressions et températures importantes. Pour pallier ce problème, nous avons choisi d'utiliser des seringues en verre. Ces seringues de laboratoire ont de nombreux avantages bien qu'elles ne soient pas faites pour une telle application. Nous en avons acheté quelques-unes de différents volumes et avons constaté qu'elles résistent à des températures élevées, frottent très peu et sont suffisamment étanches. Ces trois critères sont primordiaux pour la réalisation d'un moteur Stirling α.

b) Sources de chaleur

Bruleur à alcool

Nous choisissons un brûleur à alcool comme source de chaleur car la température de la flamme est élevée, la combustion ne rejette presque aucune suie et le brûleur est simple à réaliser. Celui-ci est constitué d'un petit récipient fermé et d'une mèche qui plonge dans l'alcool. L'alcool remonte par capillarité au fur et à mesure qu'il est brulé à l'air libre (*figure 11*).

Figure 11 : brûleur à alcool

Nous avons réalisé différentes mesures sur le brûleur pour le caractériser. Ces mesures sont effectuées avec une mèche (qui n'est autre qu'un lacet) sortie de 20 mm. Nous avons mesuré la température de la flamme à partir d'un thermocouple constitué d'une jonction torsadée de très faibles dimensions. La température mesurée est maximale au niveau de la limite supérieure de la flamme, elle atteint 1080°C.

Nous avons également mesuré la température d'une seringue en verre chauffée à partir de la flamme. Pour une mesure précise, le thermocouple est noyé dans une goutte d'étain liquide ce qui maximise le transfert thermique. La température intérieure de la seringue au-dessus de la flamme atteint 550°C, après différentes mesures panoramiques nous pouvons dire que la température moyenne d'équilibre à l'intérieur de la seringue se situe autour de 400°C. Cette température est plus faible que celle de la flamme car le verre diffuse et dissipe de l'énergie par convection et rayonnement.

Pour mesurer la puissance du brûleur il y a deux solutions, mesurer le débit de combustion de l'alcool ou mesurer directement la puissance de chauffe de la flamme. Nous avons choisi la première méthode car elle est plus accessible. Pour cela, nous avons rempli le brûleur d'alcool dont la masse totale est de 72 g. Après une combustion à puissance constante surveillée de 42 minutes, le brûleur ne pèse plus 52 g. Il a donc brûlé 21 grammes d'alcool ayant un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) de 28,87 MJ/kg. On a alors :

$$P = \frac{m.PCI}{\Delta t} = 241\,W$$

Cette puissance est très légèrement majorée car le rendement de combustion n'est pas de 100% puisqu'on sent une odeur résiduelle de combustion (une très faible quantité de molécules autres que de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone sont produites). Par ailleurs, l'alcool à bruler contient 5 à 10 % d'alcool méthylique (dénaturant) dont le PCI est inférieur à celui de l'alcool éthylique.

Chauffage solaire

Pour faire tourner notre moteur à partir de l'énergie solaire, nous avons besoin d'une source de chaleur à haute température. Nous devons donc utiliser un concentrateur solaire. Nous avons pour cela récupéré une lentille de Fresnel de 66 x 88 cm dans un ancien téléviseur à tube cathodique et rétroprojection (*figure 12*). Nous avons créé un encadrement autour de la lentille pour qu'elle reste dans le même plan en tous points afin de minimiser la surface de sa tâche focale (*figure 13*).

Figure 12 : grande lentille de Fresnel (0.58 m²)

Figure 13 : encadrement de la lentille de Fresnel

A partir de plusieurs équipements dont un solarimètre, nous avons mesuré l'éclairement solaire maximal par mètre carré au sol, par temps dégagé, l'été, au zénith et près de Paris. Celui-ci vaut 864 W/m². Si l'on incline notre lentille en direction du soleil, on peut récupérer une puissance plus élevée. Au solstice d'été, à midi solaire, à Paris, le soleil n'est pas à la

verticale du sol mais à 35,4°. On peut ainsi calculer l'éclairement maximal si la lentille est orientée vers le soleil :

$$E_{orienté} = E_{sol}\frac{1}{\cos\alpha} = 1060\ W/m^2$$

C'est l'éclairement incident maximal qui peut arriver sur notre lentille, comme celle-ci a une surface de 0,58 m², la puissance correspondante est $P_{incidente\ lentille} = 615\ W$.

Pour déterminer la puissance réellement disponible au niveau du foyer nous sous sommes aidés d'un petit panneau solaire photovoltaïque. Pour une source de lumière donnée, le courant électrique produit par une cellule photovoltaïque est directement proportionnel au débit de photons incident (autrement dit à l'éclairement, la constante de proportionnalité étant le rendement quantique de la cellule). La tension produite par la cellule obéit en revanche à une loi beaucoup plus complexe, non proportionnelle et qui dépend de nombreux autres facteurs comme le type de cellule ou la température. Nous avons donc mesuré le courant de court-circuit de la cellule pour avoir une information sur l'éclairement (*figure 14*). Bien que l'on ne connaisse pas la valeur du rendement quantique de la cellule, celui-ci est identique dans les différentes expériences que nous avons réalisées ce qui permet de comparer des mesures entre-elles.

Figure 14 : dispositif de mesure pour comparer les puissances incidentes

Le courant maximum mesuré lorsque le panneau est parfaitement orienté vers le soleil est de 185 mA, ce courant descend à 171 mA en moyenne immédiatement après la lentille et dans les mêmes conditions. Nous en déduisons donc par le rapport des deux courants que la lentille a un rendement de transmission $\eta_{trans} = \frac{171}{185} = 92{,}4\ \%$.

Dans le but de calculer la puissance disponible seulement au niveau du foyer de la lentille, nous pouvons calculer la puissance moyenne qui diverge, c'est-à-dire la puissance du

rayonnement qui passe à travers la lentille mais qui ne se retrouve pas au niveau du foyer. L'éclairement diffus du ciel sans les rayons solaires directs correspond à un courant de 18 mA avec la cellule photovoltaïque soit environ 10 % par rapport au soleil direct. Cet éclairement diffus vaut cependant 40 mA en moyenne sous la surface de la lentille ce qui montre qu'une partie des rayons sont mal déviés par la lentille. Sachant que la surface du foyer est négligeable devant la surface de la lentille et que l'éclairement diffus du ciel reste diffus après son passage dans la lentille, nous pouvons définir un rendement de focalisation :

$$\eta_{foc} = \frac{E_{orienté} - E_{diffus\ arpès\ lentille}}{E_{orienté}} = 78{,}7\ \%$$

Finalement, la puissance restante sur le point focal est $P_{incidente\ lentille} \cdot \eta_{foc} \cdot \eta_{trans}$= 447 W ce qui est du même ordre de grandeur que la puissance du brûleur. De plus, le diamètre du point focal est de 15 mm, comme celui de la flamme dans la partie jaune, nous pouvons donc nous attendre, par analogie, à une température maximale du même ordre de grandeur.

Pour maximiser le rendement de conversion de la puissance du point focal vers la seringue transparente, nous l'avons recouverte d'une couche de carbone noire très absorbante (*figure 15*) issue de la combustion incomplète du bois. Cette couche de carbone supporte bien les températures élevées car le carbone est l'élément qui a la plus haute température de fusion, 3500°C. Il peut cependant brûler à l'air ambiant en réaction avec le dioxygène.

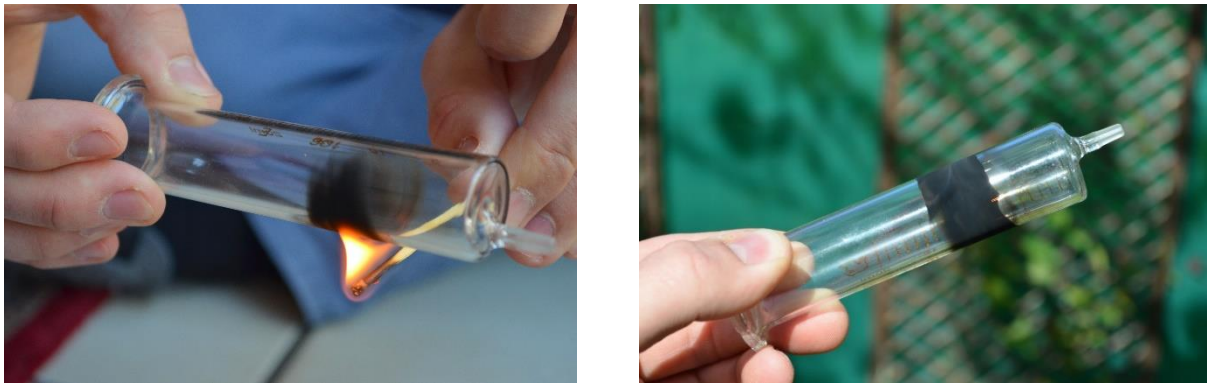


Figure 15 : couche de carbone qui recouvre la seringue à chauffer

Nous avons placé un dépôt suffisamment large pour recevoir le point focal, nous pouvons ainsi considérer que le rayonnement incident est intégralement reçu par un corps noir, c'est-à-dire une surface capable d'absorber la totalité des rayonnements qu'elle reçoit. La température maximale que pourrait atteindre la surface noire à l'équilibre thermique est (ε est l'émissivité de la surface, σ est la constante de Stefan-Boltzmann) :

$$P_{reçue} = S.\sigma.\varepsilon.(T^4_{maximale} - T^4_{ambiante}) = \frac{\pi.D^2}{4}.\sigma.(T^4_{maximale} - T^4_{ambiante})$$

$$T_{maximale\ avec\ cette\ lentille} = \sqrt[4]{\frac{4.P_{reçue}}{\pi.D^{2}.\sigma} - T_{ambiante}^{4}} = 2062°C$$

Dans la pratique, nous avons atteint une température maximale de l'ordre de 1500 °C avec du carrelage noir dans notre vidéo « 1 500 °C avec le soleil ».

Dans la configuration du moteur Stirling, la seringue conduit la chaleur en dehors de la zone chauffée donc la température maximale est nettement plus faible. En considérant que la conduction thermique dans la seringue répartisse également la chaleur sur toute sa surface, la température d'équilibre théorique descend à 630°C. Cette valeur est indicative mais nous montre que notre système de chauffage solaire est en tous points plus performant que notre brûleur et donc que si le moteur Stirling fonctionne avec le brûleur, il peut aussi fonctionner avec la lentille. Ces calculs nous montrent également que la lentille doit être utilisée avec précaution. En effet, la température maximale que l'on peut atteindre en théorie dépasse la température de fusion du verre qui est d'environ 1500 °C. D'après nos essais, une température bien plus faible est suffisante pour briser une seringue s'il y a un gradient de température important. La dilatation thermique locale entraîne des contraintes que le verre, matériau de type fragile, ne peut pas encaisser. Il faut donc chauffer progressivement la seringue en réduisant graduellement la surface du foyer afin de ne pas la briser (*figure 16*).

Figure 16 : seringue chauffée par la lentille de Fresnel avec un foyer large

c) Cycle réel

Comme nous l'avons vu précédemment (*figure 5*), le cycle du moteur Stirling est souvent décrit comme comportant de types de transformations successives. Des variations de température à volume constant (transformations isochores) et des variations du volume à température constante (transformations isothermes), *figure 17*. Ce cycle n'est pas compatible

avec un moteur réel en rotation. En effet, il prévoit que le volume varie uniquement durant les phases isothermes or un moteur réel tourne en permanence et il y a donc constamment des variations de volume. Il n'y a que quatre points du cycle réel qui coïncident avec le cycle théorique usuel : lorsque les pistons vont à la même vitesse, en sens opposé, le volume est momentanément constant (points isochores). La quadrature de phase des pistons génère aussi deux points par révolution où l'un des cylindres est vide, le gaz évolue donc momentanément à température constante dans l'autre cylindre (points isothermes).

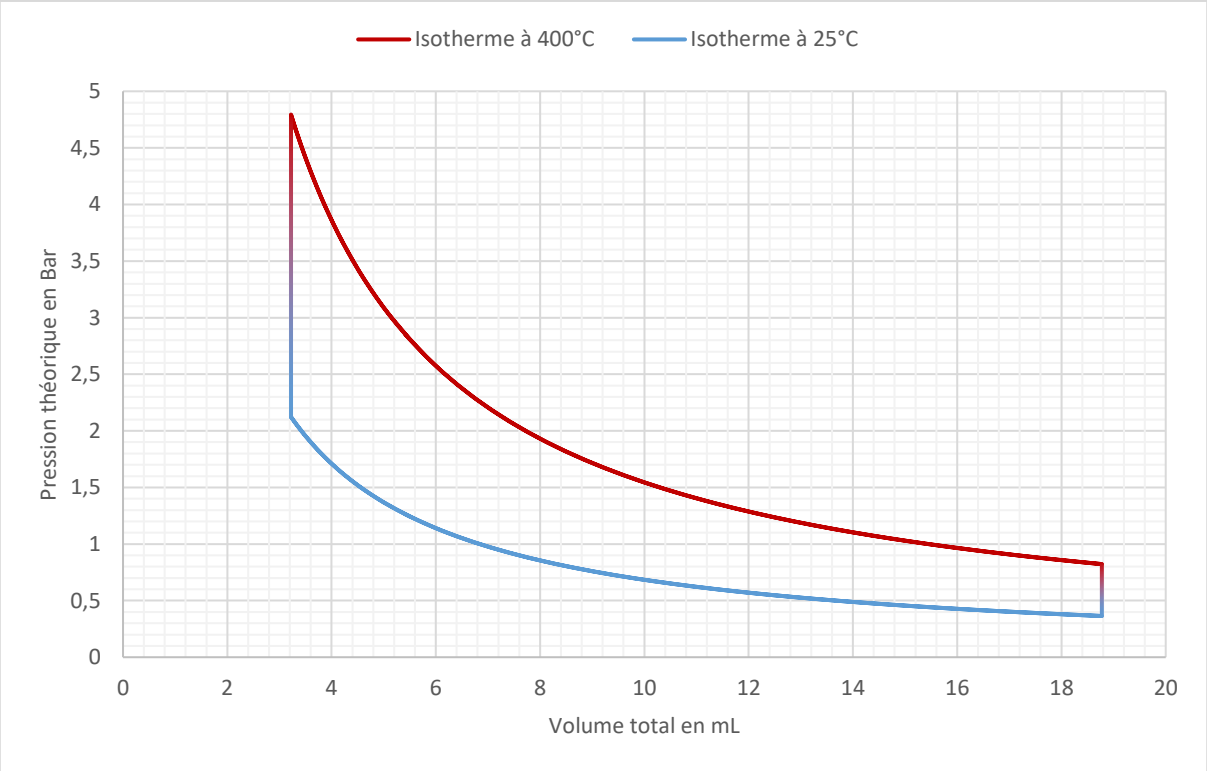


Figure 17 : cyclique théorique de Stirling appliqué à notre moteur

La première amélioration que nous pouvons proposer au cycle théorique appliqué, c'est de lui faire suivre la course sinusoïdale des pistons. Pour cela, commençons par déterminer le volume d'air de chaque cylindre en fonction de l'angle du moteur. Prenons comme point de départ le début de l'apport de chaleur lors du chauffage isochore. Cela correspond à un volume de gaz initialement nul dans le cylindre chaud. On note V_c la cylindrée coté chaud, nous avons déterminé ce volume en fonction de l'angle α :

$$V_c(\alpha) = \frac{V_c}{2}\left(\sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) + 1\right)$$

Cette relation nous donne la fonction $Vchaud(\alpha)$ sur la figure 8. Le piston froid, de son côté, est retardé d'une quadrature de phase, son volume en fonction de α se note alors :

$$V_f(\alpha) = \frac{V_f}{2}(\sin(\alpha - \pi) + 1)$$

Le volume de gaz total correspond à la somme du volume contenu dans les deux seringues, on note V le volume d'un cylindre car les cylindres ont le même volume (*figure 18*). On pourra aussi prendre en compte un volume mort, volume dû à la conduite qui relie les cylindres.

$$V_{total}(\alpha) = V_c(\alpha) + V_f(\alpha) = \frac{V}{2}\left(\sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) + \sin(\alpha - \pi) + 2\right) = \cdots = V\left(\frac{\sqrt{2}}{2}.\sin\left(\alpha - \frac{3\pi}{4}\right) + 1\right)$$

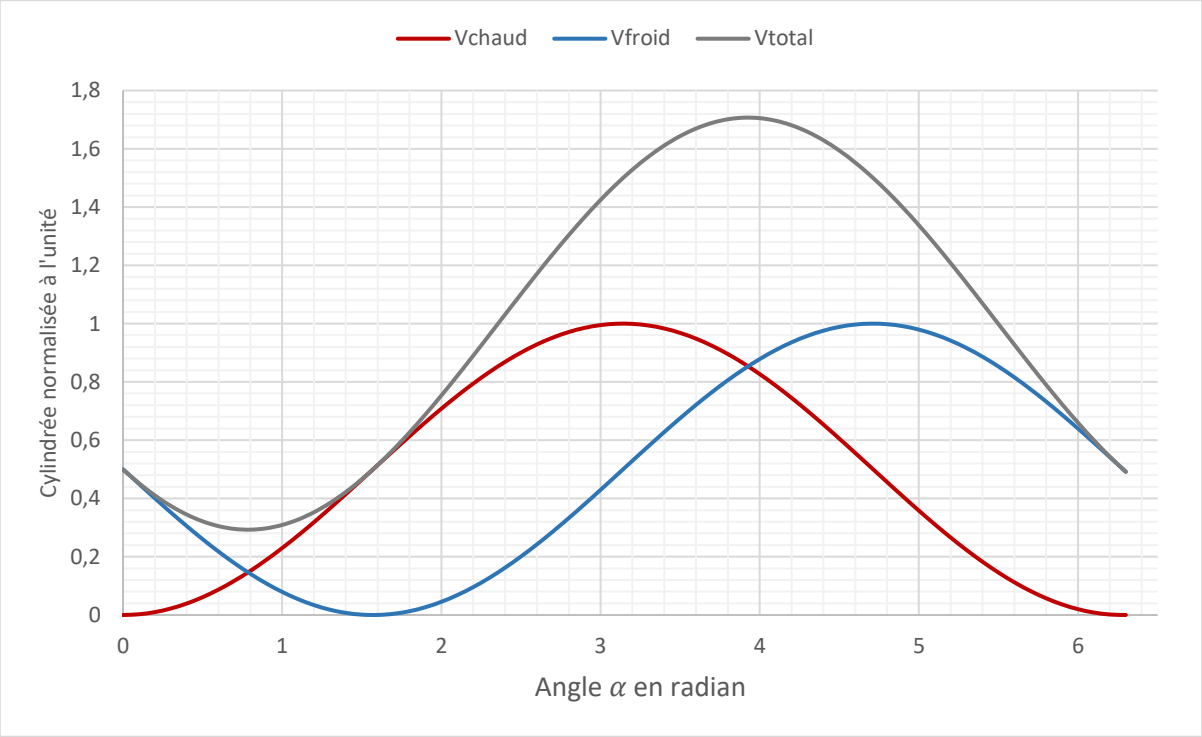


Figure 18 : les différents volumes durant un cycle du moteur

Nous remarquons que le volume moyen de gaz dans le moteur est celui de la cylindrée d'un seul des cylindres. Nous pouvons également noter que le rapport volumétrique maximum d'un moteur Stirling α est de :

$$\frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + \frac{\sqrt{2}}{2}}{1 - \frac{\sqrt{2}}{2}} = 5{,}83$$

Dans l'objectif de tracer un cycle théorique pour approcher le fonctionnement réel du moteur Stirling α, il nous reste à déterminer la pression en fonction de l'angle de rotation. Nous allons pour cela utiliser la loi des gaz parfaits et considérer que le gaz est immédiatement à la température du cylindre dans lequel il se trouve. La pression sera aussi considérée identique dans chaque cylindre car ils communiquent. D'après la loi des gaz parfaits, la pression peut se noter :

$$P(\alpha) = \frac{nRT_m(\alpha)}{V_{total}(\alpha)}$$

La température moyenne du gaz T_m dépend de la position relative du gaz, prenons une moyenne pondérée par le volume de gaz dans le cylindre chaud et froid :

$$T_m = \frac{V_c.T_c + V_f.T_f}{V_{total}(\alpha)}$$

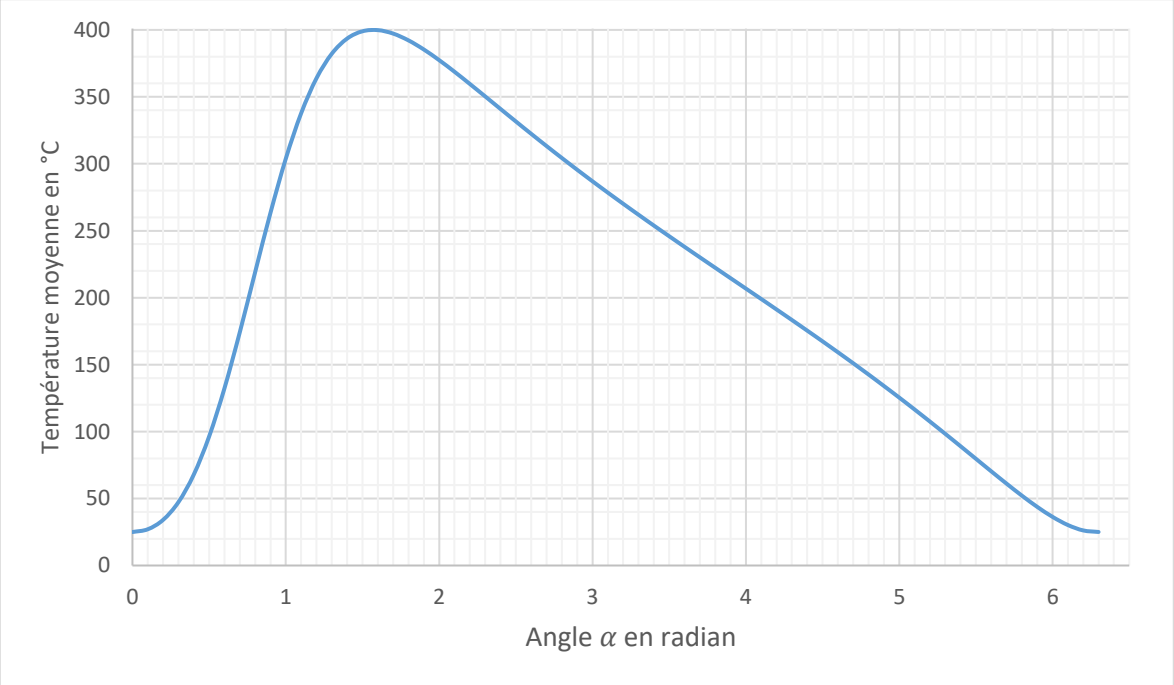


Figure 19 : variation théorique de la température durant un cycle

Nous voyons sur la *figure 19* que dans un premier temps la température monte rapidement, cela correspond à la phase isochore où le gaz est transféré dans le cylindre chaud. Nous avons ensuite un plateau qui est ponctuellement l'image de l'isotherme chaude. Par la suite, le gaz est progressivement transféré dans la seringue froide d'où la diminution de température.

Finalement, nous avons l'expression théorique générale de la pression :

$$P(\alpha) = \frac{nR(V_c.T_c + V_f.T_f)}{V_{total}(\alpha)^2} = \frac{nR\left[\left(\sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) + 1\right).T_c + (\sin(\alpha - \pi) + 1).T_f\right]}{2\left(\frac{\sqrt{2}}{2}.\sin\left(\alpha - \frac{3\pi}{4}\right) + 1\right)^2}$$

Le cycle obtenu sur la *figure 20* représente le cycle théorique approché d'un moteur Stirling α, il est plus réaliste que le cycle théorique générique d'un moteur Stirling car il prend en compte les variations sinusoïdales de volume dans les cylindres. Le cycle obtenu est mathématiquement dérivable en tout point, il ne comporte aucune discontinuité. On peut identifier sur celui-ci deux courbes isothermes qui sont reliées par des points isochores.

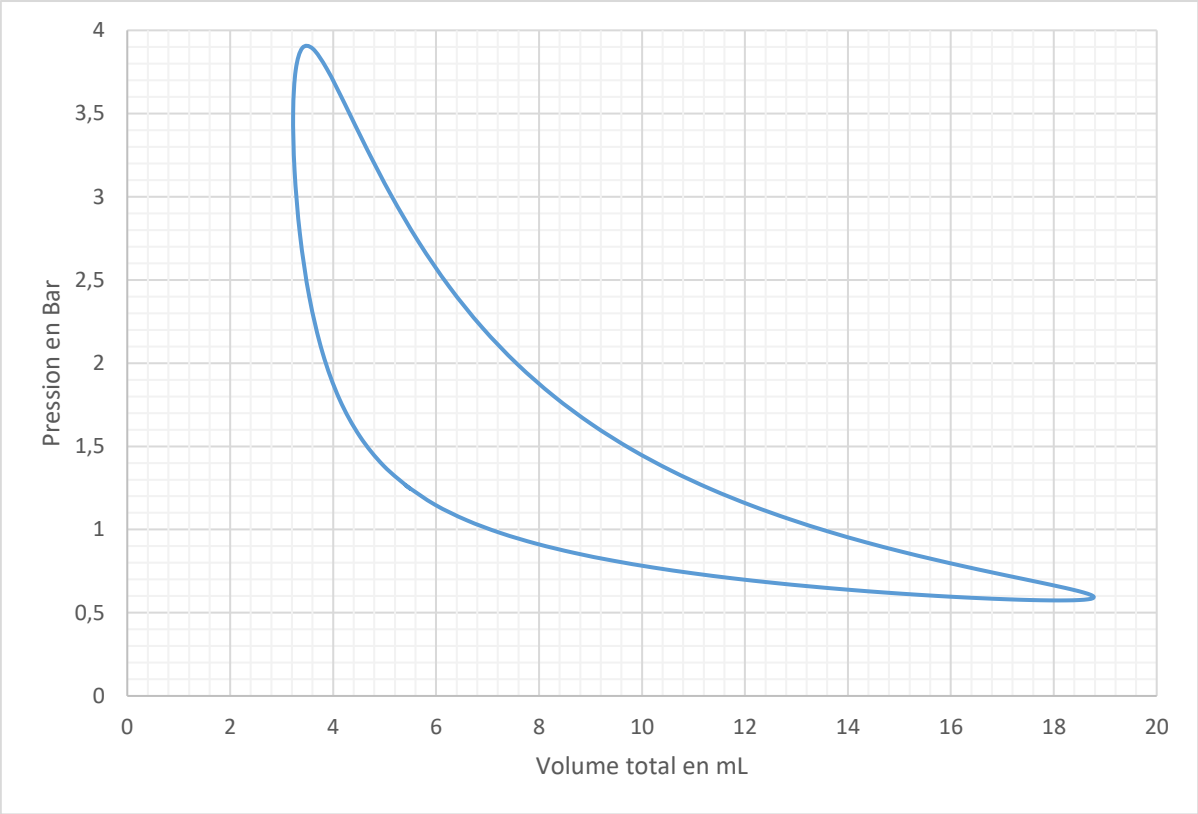


Figure 20 : cycle théorique obtenu en confrontant $P(\alpha)$ et $V_{total}(\alpha)$

Le travail récupéré pour un tour correspond à l'aire à l'intérieur de la courbe soit :

$$W_{indiqué} = 0{,}98 \text{ J}$$

La chaleur consommée pendant un tour est celle permettant de chauffer le volume de gaz de 25°C à 400°C puisqu'à chaque cycle, la totalité du gaz est chauffé puis refroidi. Cette quantité d'énergie s'écrit :

$$W_{consommé} = \rho . V . \int_{T_{froid}}^{T_{chaud}} C_p\,(T) . dt = m_{mair} . (h_{air\ sec\ 400°C} - h_{air\ sec\ 25°C}) = 3{,}06\ J$$

Le rendement théorique du moteur sans régénérateur est donc de $\eta = \frac{W_{indiqué}}{W_{consommé}} = 32\%$ soit la moitié d'un moteur théorique de Carnot dans les mêmes conditions de température. Si l'on utilise un régénérateur entre les deux cylindres, on économise une partie de l'énergie de chauffage. En l'occurrence, l'énergie du transfert isochore du cylindre chaud vers froid peut être emmagasinée pour le transfert isochore du cylindre froid vers chaud. Cela réduit donc la quantité de chaleur nécessaire pour produire autant de travail ce qui augmente le rendement.

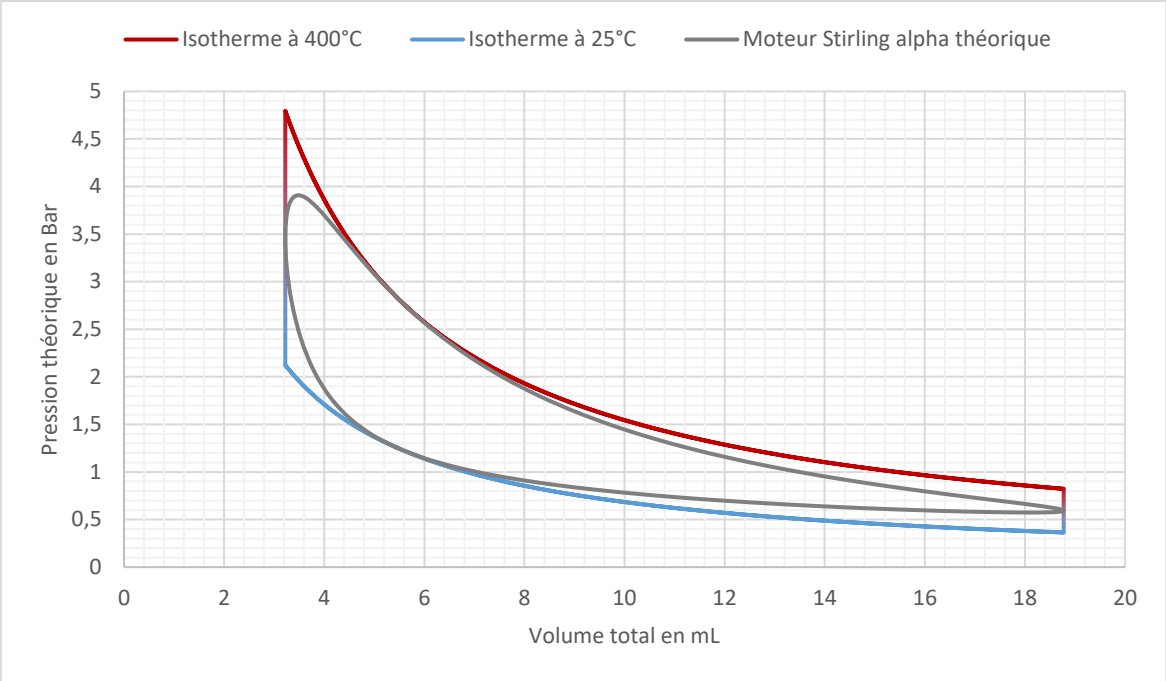


Figure 21 : comparaison entre le cycle de Stirling et celui d'un moteur Stirling α idéal

Nous avons décrit analytiquement le cycle théorique idéal d'un moteur Stirling α, celui-ci est différent du cycle de Stirling générique, le travail que l'on peut récupérer est plus faible car le cycle ne va pas jusqu'aux extrémités (*figure 21*). Le cycle du moteur α est inclus dans le cycle de Stirling, nous retrouvons d'ailleurs les quatre points où les courbes se rencontrent.

Prise en compte du volume mort

Nous pouvons à présent améliorer ce cycle de façon à obtenir le cycle analytique théorique le plus proche possible du cycle pratique de notre moteur. Notre moteur Stirling comporte un volume mort, celui-ci est négligeable dans les seringues mais le volume estimé du tuyau est le suivant :

$$\frac{\pi . D_{conduite}{}^{2}}{4}(longeur\ entre\ les\ seringues + 2.longeur\ des\ embouts) = \sim 2{,}2mL$$

La *figure 22* représente le cycle obtenu si l'on prend en compte le volume mort. Le volume maximum atteint est plus élevé grâce au volume mort mais la pression maximale est nettement plus faible 2,4 bar au lieu de 3,9 précédemment. En somme, la surface du cycle est réduite d'un tiers avec un volume mort de 2,2mL. Le travail du cycle est d'environ 0,65 J au lieu de 0,98 J, cela nous montre qu'il est très important de réduire autant que possible le volume mort. Pour ce faire, nous pouvons réduire le diamètre du tuyau mais cela augmente

fortement sa perte de charge (typiquement proportionnelles à l'inverse de la puissance 4 du diamètre).

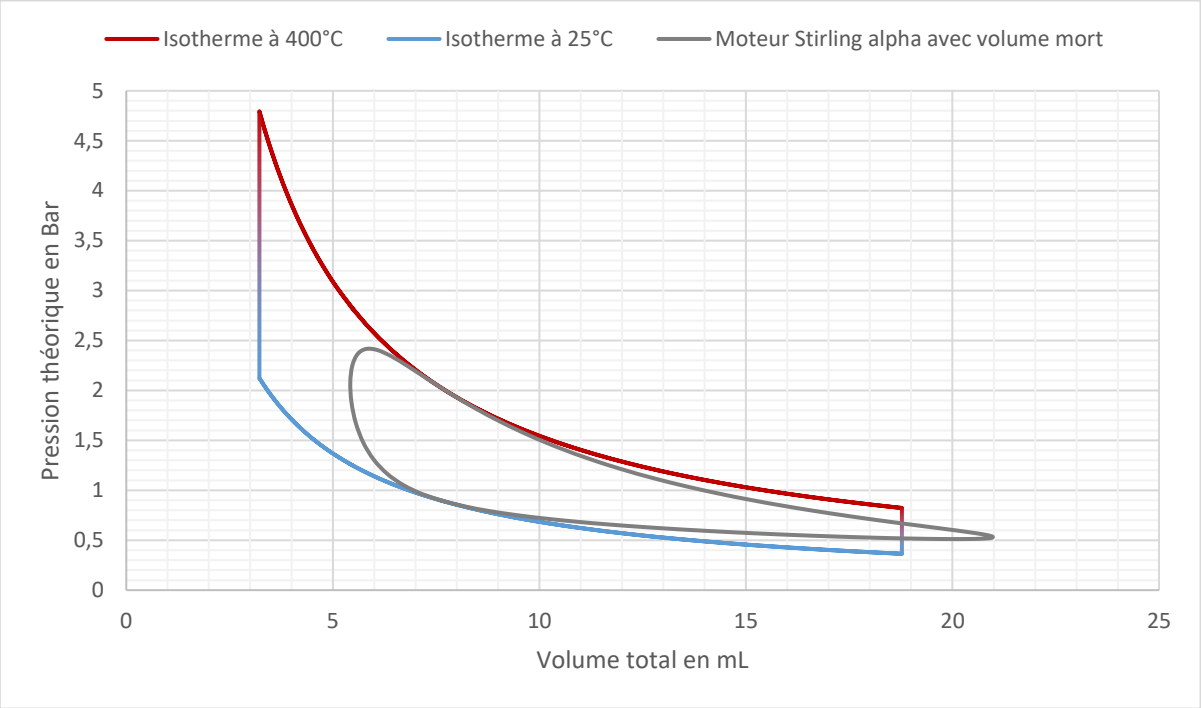


Figure 22 : cycle du moteur Stirling α idéal avec prise en compte du volume mort

d) Estimation de la perte de charge du tuyau

La perte de charge dans le tuyau qui relie les deux seringues est une chute de pression liée au frottement de l'air contre ses parois. Lorsque l'air circule dans le tuyau, sa pression n'est pas la même en tout point mais diminue progressivement dans le sens du déplacement (à la manière de la chute de tension d'une résistance traversée par un courant électrique). Cette chute de pression affecte le cycle thermodynamique en réduisant la puissance indiquée. Dans cette partie, nous allons considérer que l'effet de la perte de charge n'affecte pas l'allure du cycle thermodynamique mais induit une perte de puissance globale qui sera retranchée à la puissance indiquée.

Pour réaliser une estimation des pertes de charge régulières dans le tuyau il faut connaître l'ordre de grandeur de la vitesse moyenne de circulation du gaz en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Pour simplifier le problème, nous pouvons considérer que les seringues sont en opposition de phase, le gaz passe alors d'une seringue à l'autre sans être compressé. Nous choisissons également une température moyenne constante de 212°C, les deux hypothèses précédentes nous permettent de considérer que le gaz a une densité constante. La vitesse moyenne sur une révolution peut alors s'écrire :

$$V_{moy\ rms\ piston} = V_{max}.\sqrt{\langle \sin \alpha^2 \rangle} = \Omega.e.\frac{\sqrt{2}}{2}$$

La vitesse maximale des seringues est proportionnelle à la vitesse de rotation des volants d'inertie et à l'excentricité des bielles, nous choisissons comme valeur moyenne approximative la valeur RMS de la fonction sinus car la perte de charge n'est pas proportionnelle à la vitesse de circulation. Par conservation du débit volumique :

$$V_{moy\ gaz\ tuyau} = V_{moy\ RMS\ piston}.\frac{S_{seringue}}{S_{tuyau}} = \Omega.e.\frac{\sqrt{2}}{2}.\left(\frac{D_{seringue}}{D_{tuyau}}\right)^2$$

Pour un diamètre du tuyau de 4 mm, une vitesse de rotation 250 tours par minute et une excentricité de 20 mm (prédimensionnement), le nombre de Reynolds vaut :

$$Re = \frac{V_{moy\ gaz\ tuyau}.D_{tuyau}}{\upsilon_{air\ \text{à}\ 212°C}} = 1040 < 2300$$

Le régime d'écoulement est donc laminaire, le régime est encore laminaire si on prend un diamètre deux fois plus petit ou une vitesse de rotation deux fois plus grande, on peut donc considérer que le régime d'écoulement sera tout le temps laminaire (y compris dans les seringues). En régime laminaire, dans une conduite cylindrique, la perte de pression s'écrit :

$$\Delta P = \frac{1}{2}.\rho.v^2.\frac{L}{D}.\frac{64}{Re} = \cdots = \frac{128.\mu_{air\ \text{à}\ 212°C}.L.Q_v}{\pi.D^4} \quad et \quad P_{pertes\ de\ charge} = Q_v.\Delta P$$

$$P_{pertes\ de\ charge} = 4\pi.\Omega^2.e^2.\left(\frac{D_{seringue}}{D_{tuyau}}\right)^2.\mu_{air\ \text{à}\ 212°C}.L = \sim 8\ mW$$

$$Et \quad W_{perdu\ par\ tour} = Q_v.\Delta P.\frac{1}{N_{tour\ par\ seconde}}$$

$$= 8\pi.{V_{gaz}}^2.\mu_{air\ \text{à}\ 212°C}.L.\frac{1}{N_{tour\ par\ seconde}}$$

$$Finalement,\ W_{perdu\ par\ tour} = 8\pi^2.\Omega.e^2.\left(\frac{D_{seringue}}{D_{tuyau}}\right)^4.\mu_{air\ \text{à}\ 212°C}.L = \sim 1{,}9.10^{-3}\ Joule$$

Le travail perdu par frottements visqueux sur un cycle est proportionnel à la vitesse de rotation mais il dépend de D_{tuyau}^{-4}.

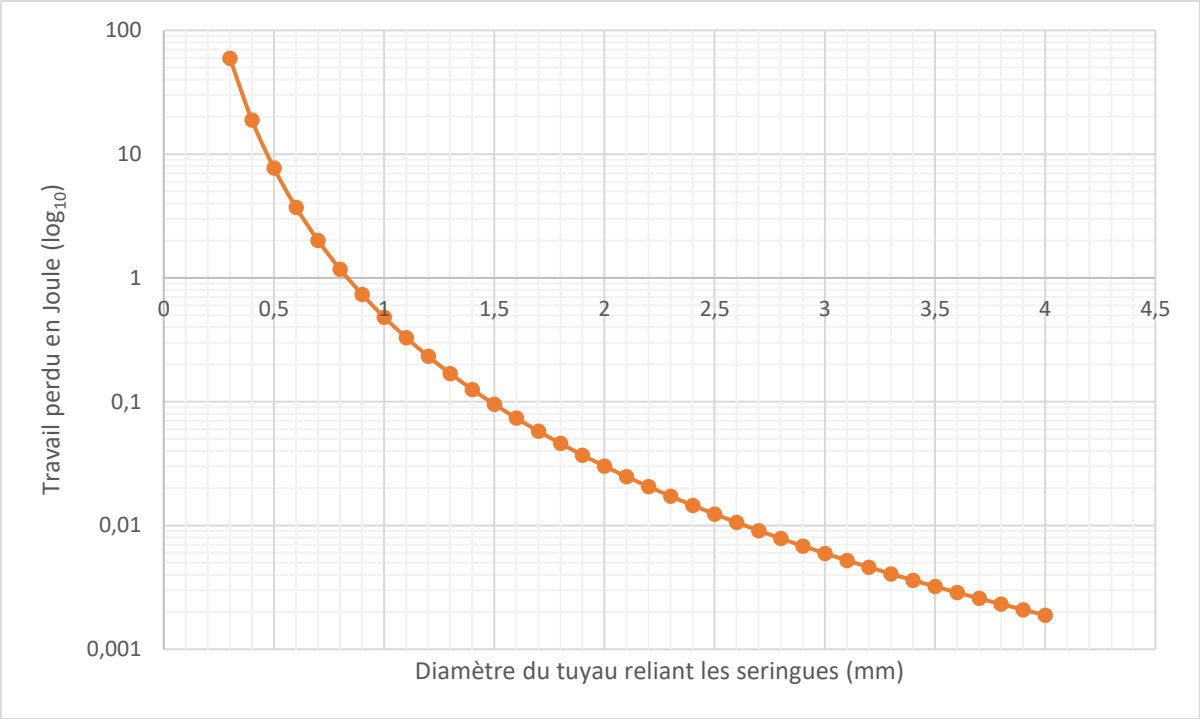


Figure 23 : ordre de grandeur de la perte d'énergie par cycle en fonction du diamètre du tuyau

La *figure 23* présente le travail perdu à chaque cycle en fonction du diamètre du tuyau. Nous avons vu, lorsque nous avons établi le cycle réel, que le travail indiqué théorique varie beaucoup en fonction du volume mort, celui-ci doit donc être minimisé. Le travail indiqué théorique sur un cycle est de l'ordre d'un joule. Pour maximiser le travail réel, nous pouvons nous permettre de réduire le diamètre du tuyau jusqu'à 1,8 mm sans que cela ne fasse perdre plus de 5 % du travail indiqué. C'est un compromis qui permet de maximiser le travail du cycle réel tout en ayant une perte de charge relativement faible.

e) Dimensionnement du volant d'inertie

Le volant d'inertie permet au moteur d'avoir une vitesse de rotation aussi stable que possible bien que certaines phases apportent du travail tandis que d'autres en consomment (ce qui a tendance à accélérer ou ralentir le moteur). Le volant d'inertie n'est théoriquement pas obligatoire d'un point de vue énergétique car le moteur, donc les organes en mouvement, pourrait accélérer puis ralentir fortement durant un cycle en stockant puis libérant de l'énergie cinétique. En pratique, le volant d'inertie est indispensable car les frottements et la perte de charge seraient trop importants aux vitesses élevées atteintes après un apport de travail. Les contraintes et l'usure mécanique sont également réduites lorsque la vitesse de

rotation est stable. L'extraction de travail vers une charge (par exemple un générateur électrique) durant une révolution est également nettement plus facile à mettre en œuvre.

L'énergie cinétique correspond à l'énergie contenue dans un corps du fait de son mouvement, elle dépend de deux variables, sa vitesse v et sa masse m. Elle vaut pour une translation :

$$E_c = \frac{1}{2}.m.v^2$$

On en déduit que plus le volant d'inertie est massif (ou plutôt de moment cinétique élevé pour être rigoureux), plus la variation d'énergie cinétique durant un cycle induit une variation de vitesse faible.

Calculons l'énergie cinétique d'un cylindre en rotation, on ne peut pas utiliser directement la relation précédente car plus un point est éloigné de l'axe de rotation, plus sa vitesse est élevée. Un élément de masse excentré a donc plus d'importance qu'un autre situé vers le centre. Nous ne raisonnons donc pas sur la masse totale mais sur la masse volumique ρ. L'énergie cinétique en un point vaut alors (seulement si la masse volumique du matériau est la même en tout point) :

$$de_c = \frac{1}{2}\,\rho V.v(r)^2 = \frac{1}{2}\,\rho.L.dS.v(r)^2 = \frac{1}{2}\,\rho.L.r.dr.d\theta.v(r)^2 = \frac{1}{2}\,\rho.L.r.dr.d\theta.r^2.\Omega^2$$
$$= \frac{1}{2}\,\rho.L.\Omega^2.r^3.dr.d\theta \qquad On\ intère\ sur\ la\ suface\ (profondeur\ L\ constante)$$

$$E_c = \iint_{0\,0}^{R\,2\pi} dec = \iint_{0\,0}^{R\,2\pi} \frac{1}{2}\,\rho.L.\Omega^2.r^3.dr.d\theta = \frac{1}{2}\,\rho.L.\Omega^2 \iint_{0\,0}^{R\,2\pi} r^3.dr.d\theta = \frac{1}{2}\,\rho.L.\Omega^2.\left[\frac{r^4}{4}\right]_0^R.2\pi = \frac{\pi}{4}\rho.L.\Omega^2.R^4$$

L'énergie cinétique augmente donc avec le rayon du cylindre en R^4. La masse du cylindre vaut :

$m = \rho.V = \rho.L.\pi.R^2$ Par identification on a : $E_c = \frac{1}{4}.m.\Omega^2.R^2 = J.m.\Omega^2$

On en déduit que pour un matériau de masse volumique constante, augmenter le rayon du volant d'inertie R est nettement plus intéressant qu'augmenter son épaisseur L.

A vitesse de rotation fixée, les pertes dans les roulements à billes qui supportent le volant d'inertie sont proportionnelles à sa masse, elles sont cependant totalement négligeables à l'échelle des autres pertes, il n'y a donc pas de compromis pour la taille du volant d'inertie, plus il est grand, plus la vitesse de rotation est stable au cours d'un cycle. Le rayon du voltant d'inertie peut alors être dimensionné en fixant un rapport $\Delta\Omega/\Omega$ minimum durant un cycle.

Dans le cas de notre moteur, nous avons dimensionné le volant d'inertie pour que son énergie cinétique à 250 tours par minute permette d'assurer une compression totale du gaz.

$$e_{ener.\ comp.\ isotherme} = P.dV = n.R.T.\frac{dV}{V} \quad \Longrightarrow \quad E_{comp} = n.R.T.\ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right) = 1{,}2\ Joule$$

$$R = \sqrt[4]{\frac{4.E_{comp}}{2_{(volants)}.\rho.\pi.L.\Omega^2}} = 10{,}5\ cm \qquad \rho_{bois\ MDF\ expérimental} = \frac{4{,}120\ kg}{6{,}773.10^{-3}\ m^3} = 608\ kg/m^3$$

Nous avons donc choisi deux volants en MDF de 105 mm de rayon, ils pèsent 300 g chacun. Ce rayon a une influence sur les dimensions d'autres pièces du moteur comme la longueur des bielles.

2) Fabrication du moteur

a) Résistance des seringues

Résistance mécanique

Avant de se lancer dans la fabrication d'un moteur Stirling de type α, nous avons commencé par évaluer la faisabilité de ce projet. Comme nous l'avons expliqué précédemment, les éléments principaux du moteur sont des seringues en verre qui servent de pistons. Ces seringues sont normalement utilisées pour prélever des fluides dans des laboratoires et en médecine. Elles sont autoclavables jusqu'à 200°C mais rien ne garantit qu'elles puissent supporter des températures supérieures. Nous avons mesuré la température maximale en haut d'une flamme d'alcool, celle-ci atteint 1080°C. Cela ne signifie pas qu'une seringue chauffée par une flamme d'alcool atteint 1080°C degrés car la chaleur se diffuse sur toute sa surface. Conscients du risque de casser les seringues en les chauffant avec une flamme, nous avons d'abord effectué tous les tests de résistance thermique sur une première seringue : chauffage par une flamme des différentes parties, refroidissement rapide par convection forcée, déplacement rapide du piston, etc. La seringue ne s'est jamais brisée sauf avec une trempe dans l'eau. Nous en avons déduit qu'il vaut mieux ne jamais essayer de refroidir trop rapidement les seringues, même avec de l'eau brumisée.

Ces tests thermiques nous ont permis de nous assurer que les seringues en verre résistent très bien à un chauffage par flamme d'alcool. Nous avons également testé la résistance de la seringue à la pression et à la torsion et en avons déduit, compte tenu des pressions et force en jeu, que notre moteur ne risquait pas de les casser en fonctionnement normal. Ce n'est cependant pas le cas du transport car environ une seringue sur trois arrive brisée, notamment

au niveau de l'embout. Il ne faut donc pas hésiter à en commander au moins 4 pour en utiliser 2 sachant qu'une sera brisée en arrivant et l'autre sera cassée par accident.

Résistance au déplacement

Un autre test important à effectuer sur les seringues est de s'assurer qu'elles ne frottent pas trop en mouvement. Un moteur Stirling qui tourne sans entraîner de charge ne travaille que pour compenser ses propres frottements, réduire d'un facteur 2 les frottements c'est doubler les chances de fabriquer un moteur qui tourne. Une seringue ordinaire en plastique avec un joint en caoutchouc est difficile à mouvoir et ne pourrait en aucun cas être utilisée pour un moteur Stirling (sans parler de la résistance à la température). Les seringues en verre sont faites de deux pièces parfaitement ajustées dont l'une est en verre dépoli. Leur résistance à la pression est plus faible (si on presse sur le piston en bouchant l'orifice de sortie, de l'air peut progressivement s'échapper par les parois) mais leur friction est nettement amoindrie. Si une seringue en verre est placée en position verticale, le piston tombe par gravité, preuve de la faible friction.

La diminution des frottements des seringues est une des parties les plus importantes pour accroître les performances du moteur. Nous avons essayé de nombreuses méthodes et la technique la plus efficace est la suivante : nettoyer les seringues à l'eau pour enlever toutes les poussières résiduelles puis les sécher à l'air libre afin de s'assurer que les parois soient les plus lisses possibles. Ajouter ensuite une quantité très faible d'huile en mettant une goute sur un tissu que l'on étale sur toute la paroi du piston (*figure 24*). La micro pellicule d'huile ainsi formée augmente l'étanchéité des seringues tout en garantissant un frottement très faible, surtout quand les seringues sont soumises à des températures élevées et qu'il y a un début de phénomène d'arc-boutement. L'arc-boutement est un phénomène dans lequel une liaison glissière se coince ou frotte fortement lieu de glisser. L'arc-boutement est d'autant plus susceptible de se produire qu'une force perpendiculaire au déplacement intervient (dans le cas du moteur, la force perpendiculaire n'est autre qu'une composante de la force fournie par les bielles ainsi que la masse des pièces et de la partie mobile des seringues)

Figure 24 : Application d'une fine pellicule d'huile sur les parois du piston

b) Constructions préliminaires

Fabriquer un moteur Stirling de toutes pièces est un travail long et délicat. Il n'est pas non plus possible de revenir en arrière quand on commence à fabriquer un moteur avec un géométrie particulière. Afin d'éviter de fabriquer un beau moteur qui ne tourne pas, nous avons décidé de commencer par utiliser un jeu de construction comme support pour tenir les seringues et les actionner par un double système bielle-manivelle déphasé d'une quadrature. Le jeu de construction s'appelle « K'nex », il est composé de tiges et de connecteurs permettant de faire des constructions en trois dimensions. Le jeu est spécialement conçu pour fabriquer des systèmes mécaniques car il y a un axe au centre de chaque connecteur et de nombreuses pièces adaptées.

Pour faire les essais à partir de « K'nex » nous avons acheté deux seringues en verre de 50 mL chacune. Ces seringues sont reliées à des connecteurs par de la colle thermofusible et un tuyau assure le passage de l'air entre-elles. Un brûleur à alcool chauffe une des deux seringues. On peut voir la première version du moteur sur la *figure 25*. Le mouvement de va-et-vient de chaque seringue est canalisé par une tige pour limiter l'arc-boutement dans les seringues et au niveau des tiges puis il atteint une bielle puis une manivelle. De chaque côté du moteur on trouve un volant d'inertie.

Malgré un grand nombre d'essais en changeant plusieurs paramètres (volume du tuyau, masse des volants d'inertie, etc.) ce moteur n'a jamais tourné seul. Nous avons pourtant très rapidement observé un sens de rotation préférentiel bien qu'il faille toujours entraîner le moteur avec la main. Cela signifie que le cycle thermodynamique produit bien du travail mais trop peu pour compenser les frottements. Le principal problème de ce moteur est la grande distance qui sépare le deux systèmes bielle-manivelle. Cette distance est si longue que la tige

qui fait la jonction et dans laquelle passe le couple du moteur subit une torsion qui dissipe presque entièrement la puissance du moteur, aussi faible soit-elle.

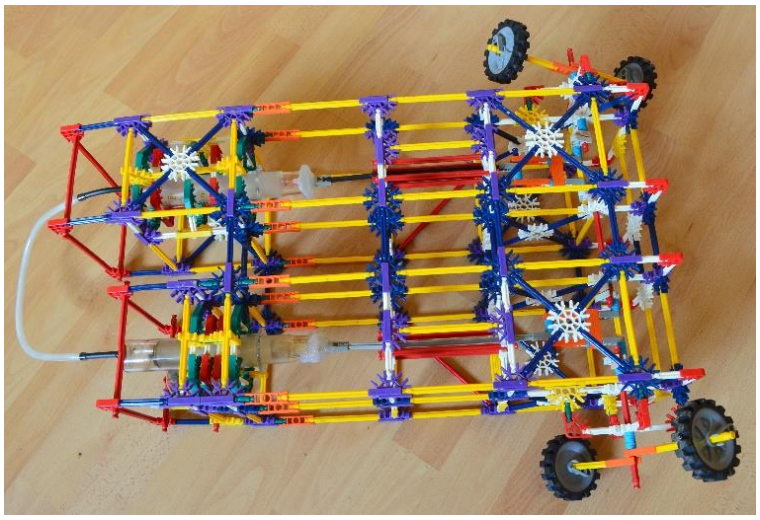


Figure 25 : première version du moteur Stirling en « K'nex »

Nous avons alors décidé de modifier le moteur en ajoutant un volant d'inertie au centre composé d'un poids de 1 kg (*figure 26*). Les pièces qui tiennent le poids participent au passage du couple ce qui réduit les pertes en torsion.

Cette version du moteur semblait plus disposée à tourner que la précédente. Pourtant ce moteur n'a jamais fait mieux que de ralentir doucement jusqu'à s'arrêter. Lors du transvasement d'air d'une seringue à l'autre, nous avons pu observer le travail fourni tour à tour par les seringues mais celui-ci semblait toujours se perdre en torsion ce qui avait pour effet de modifier momentanément le déphasage entre les deux seringues.

Figure 26 : moteur avec volant d'inertie de 1 kg

Pour être sûr de ne plus avoir de problèmes de torsion, nous avons reconstruit le moteur avec une forme différente où les seringues sont déjà en quadrature (*figure 27*). Cette forme nous a permis d'utiliser la même manivelle pour les deux seringues, à la manière d'un moteur d'avion en étoile. Ce moteur était aussi équipé de deux volants d'inertie et ne contenait pas de tiges anti arc-boutement.

Dans cette version du moteur, le couple était mieux transmis d'une seringue à l'autre. Pourtant, il n'a pas mieux tourné que le précédent. La principale explication est probablement la longueur accrue de tuyau inhérente à la géométrie. Cette longueur crée plus de pertes de charge et augmente le volume mort qui limite le taux de compression et diminue la capacité des seringues à s'échanger de la chaleur.

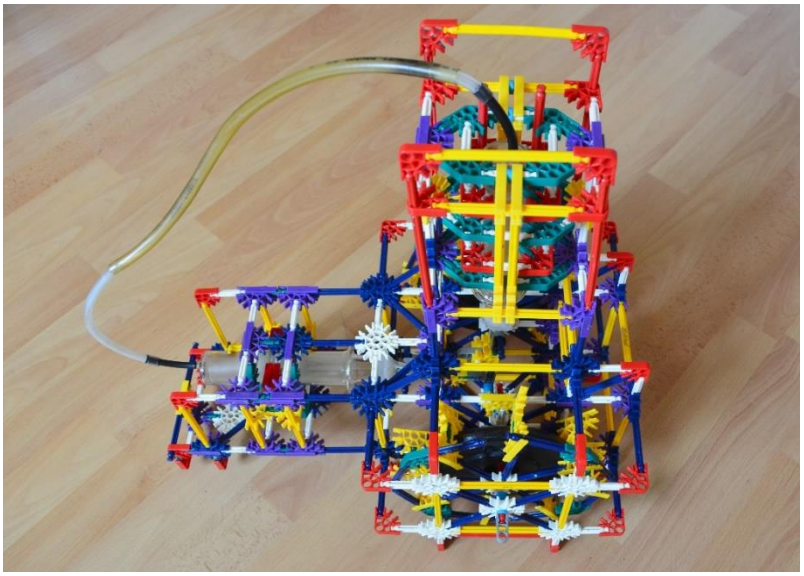


Figure 27 : moteur avec une manivelle en commun

Après avoir fabriqué au total six versions non fonctionnelles du moteur en « K'nex » nous avons décidé d'arrêter les essais et de passer directement à une version plus aboutie. Les forces en jeu lorsque le moteur tourne sont conséquentes et les tiges de plastique ne peuvent pas rester immobiles. L'ensemble des pièces bougeaient avec le moteur ce qui était à l'origine de nombreuses pertes. Les seringues n'étaient pas solidement fixées et pouvaient se déplacer. Les axes fragiles pouvaient également produire de fortes pertes.

Ces essais préliminaires nous ont tout de même permis de nous rendre compte que même pour fabriquer un moteur Stirling de faible puissance il faut de pièces solides. Nous avons appris que la fabrication d'un moteur Stirling demande une grande précision et qu'elle ne se fait pas au hasard avec quelques pièces en plastique, même lorsque l'on connaît la théorie.

Nous avons aussi remarqué quelque chose d'important avec les seringues de 50 mL que nous avons utilisées. Elles sont équipées d'embouts de petit taille (de l'ordre de 1 mm de diamètre) sur une longueur de 10 mm. Ces embouts génèrent des pertes de charge si importantes qu'il est difficile de déplacer le piston plusieurs fois par seconde, même lorsque l'on s'assure que les frottements sont réduits au niveau des parois. Nous avons donc fait attention à acheter, par la suite, des seringues avec un embout moins étroit ou des seringues avec le même embout mais de volume plus petit ce qui réduit la vitesse de passage de l'air dans l'embout.

c) Choix des matériaux

Construire un moteur Stirling α de toutes pièces nous paraissait initialement très difficile, surtout après l'échec des moteurs en « K'nex ». Quels matériaux choisir ? Où les trouver ? Il y a de nombreuses façons de fabriquer un moteur qui fonctionne mais comment être sûr d'être sur une bonne piste ?

L'une de nos premières idées a été de n'utiliser que peu de matériaux différents afin de se forcer à trouver des solutions sur place sans acheter de nombreuses pièces au fur et à mesure.

Le composant principal du notre moteur Stirling est le bois dit « medium » dont le vrai nom est MDF pour *medium density fiberboard*. Ce matériau, constitué d'un collage de fibres de bois, a l'avantage d'être isotrope, c'est-à-dire que son comportement est le même dans toutes les dimensions. Il est donc utile pour fabriquer les petites pièces qui composent le moteur. C'est un matériau qui résiste mal aux vis (les fibres peuvent s'écarter et se décoller de manière irréversible) mais qui peut facilement être collé ou effrité à la lime. Le medium existe souvent sous la forme de plaques d'une épaisseur de 10 mm ou 15 mm, nous avons utilisé ces deux épaisseurs dans notre moteur Stirling. Le moteur est aussi composé de bois de sapin, c'est un bois bon marché, solide, d'apparence claire ce qui est plus esthétique que le medium.

Pour tous les axes qui composent le moteur, nous avons utilisé des tiges en aluminium creuses, l'une possédant un diamètre extérieur de 8 mm, l'autre de 10 mm. Ces deux tiges peuvent être glissées l'une dans l'autre ce qui est utile à plusieurs endroits dans le moteur. Toujours au niveau des axes, nous avons utilisé des roulements à billes standards avec un diamètre intérieur de 8 mm. Ces roulements à billes ne sont pas neufs et ceci est volontaire. Nous avons remarqué que d'anciens roulements à billes (qui ont déjà roulé des centaines de kilomètres dans une trottinette) génèrent beaucoup moins de frottements que des roulements neufs. L'usure des billes ainsi que l'absence de graisse épaisse leur donnent d'excellentes propriétés pour de faibles charges (ces roulements sont moins performants que de roulements neufs pour leur application d'origine dans laquelle ils doivent supporter environ 25 Kg mais ne frottent presque pas pour des charges de quelques centaines de

grammes). Le moteur utilise en tout 6 roulements à billes, il n'y a donc aucun axe sans roulement.

Pour assembler tous ces matériaux nous avons utilisé des vis de 3 mm de différentes longueurs avec des rondelles, des vis avec écrous de 4 mm et des équerres. Les seringues sont reliées entre elles par des tiges en aluminium creuses et différents tuyaux en plastique. A cela nous pouvons ajouter de la colle thermofusible ainsi que de la colle cyanoacrylate (*figure 28*).

Figure 28 : principaux matériaux constituant le moteur

d) Détail des parties du moteur

Après avoir choisi les matériaux qui composent le moteur Stirling, nous avons déterminé la forme et les dimensions de chacune des pièces qui le composent. Les dimensions d'une pièce sont souvent déterminées par les dimensions des pièces qui l'entourent de sorte que nous ne disposons pas une grande flexibilité. Le design du moteur a pour objectif d'être le plus simple possible tout en permettant de modifier facilement quelques paramètres. Le dimensionnement des pièces du moteur a été une longue étape au cours de laquelle nous avons tenté de maximiser ses performances.

Dans cette partie nous allons nous intéresser aux différents ensembles du moteur afin de justifier leur forme.

Axe à pistons

Figure 29 : axes à pistons avec de la colle thermofusible d'un côté et un axe de l'autre

Il s'agit de la première partie du moteur que nous avons fabriquée. L'objectif des axes à pistons est de permettre de relier les pistons aux bielles. Ces pièces doivent être dans l'alignement parfait des pistons ce qui rend leur fabrication délicate. Le piston doit également pouvoir être retiré car il n'est pas exclu qu'il se casse. Pour répondre à ces critères nous avons décidé d'utiliser de la colle thermofusible (*figure 29*). Les axes à pistons sont simplement constitués d'un trou rectangulaire dans lequel on injecte une grande quantité de colle thermofusible. Le temps que la colle refroidisse, nous pouvons aligner le mieux possible l'ensemble formé. Si un piston se casse, nous pouvons le changer en mettant la pièce dans un four à 200°C pour faire à nouveau fondre la colle. Lorsque la colle est liquide nous pouvons retirer le piston et en mettre un nouveau à la place. Nous avons déjà effectué cette opération une vingtaine de fois.

De l'autre côté des axes à pistons, on trouve deux bras en bois entre lesquels passe l'axe des bielles. Des rondelles et des entretoises permettent également de centrer les bielles. L'ensemble des pièces en bois qui constituent les axes à pistons sont d'abord tenues entre elles par de la colle cyanoacrylate puis par des vis. L'inverse n'aurait pas été possible car sans colle le bois « medium » ne peut pas résister au passage des vis.

Bielles

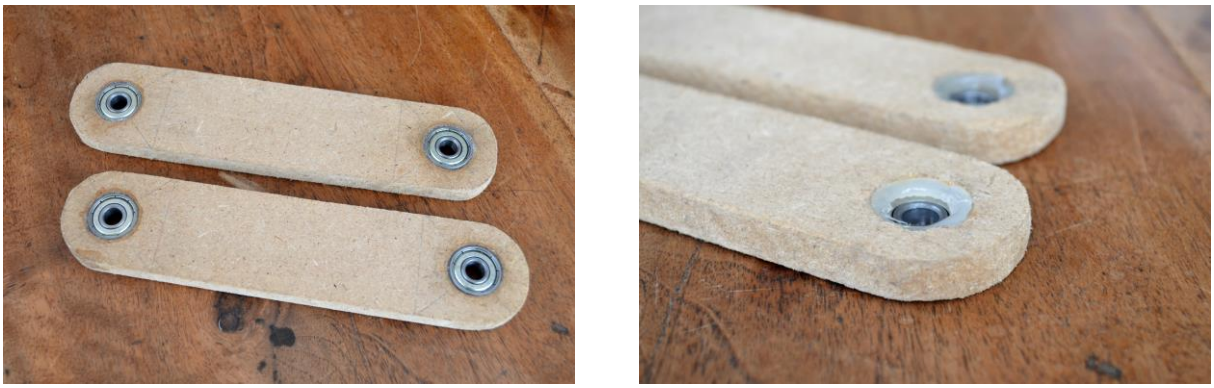


Figure 30 : bielles identiques, vues de devant et de derrière

Les bielles permettent de transformer le mouvement de va-et-vient des pistons en un mouvement de rotation. Afin de réduire les frottements au niveau de leur axes, elles sont équipées d'un roulement à billes de chaque côté. Ces roulements sont coincés dans le bois et sont maintenus par de la colle cyanoacrylate à l'extérieur et de la colle thermofusible à l'intérieur (*figure 30*). Ils sont également très légèrement lubrifiés.

Volants d'inertie

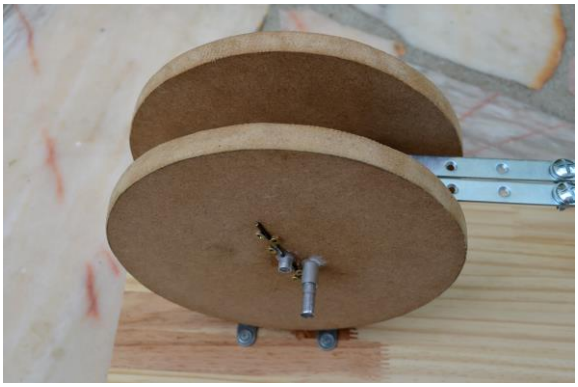


Figure 31 : volants d'inertie. Le couple est transmis via l'axe central

Les volants d'inertie permettent de stocker de l'énergie cinétique afin de stabiliser la vitesse de rotation du moteur. Dans notre moteur, ils servent également de manivelles, c'est-à-dire qu'ils donnent un mouvement de rotation aux bielles tout en échangeant de l'énergie avec elles. Les volants d'inertie sont au nombre de deux car cette géométrie est la plus simple. En effet, les volants sont rattachés de chaque côté aux bielles donc leur support doit se trouver au centre. Plutôt que de mettre un volant d'un côté et une simple manivelle de l'autre, il est préférable de fabriquer deux volants symétriques afin de limiter le couple qui circule entre les deux volants.

Pour que le couple circule entre les deux volants, autrement dit qu'ils soient solidaires et qu'ils puissent transmettre du travail entre les deux seringues, de la colle ne suffit pas ! On utilise donc des petites tiges en acier qui traversent l'axe principal (*figure 31*). Ces tiges sont tenues par des vis de telle sorte qu'il y ait toujours exactement un quart de tour de décalage entre les deux volants d'inertie.

En ce qui concerne le support, il est réalisé avec deux plaques de bois « medium » de 15 mm d'épaisseur dans lesquelles il y a deux roulements à billes les plus espacés possible. Il y en a deux car chaque roulement tolère un léger défaut de parallélisme, en les espaçant le défaut de parallélisme est supprimé.

Comment déterminer, à présent, la longueur M des manivelles, c'est-à-dire la longueur qui sépare l'axe de rotation des volants au point d'attache des bielles ? Cette longueur est liée à la course C des pistons, c'est-à-dire la distance qu'ils parcourent quand le moteur fait un demi-tour. C Et M sont liés par la relation $C = 2M$. La course des pistons doit être inférieure à la longueur L des seringues autrement ils pourraient en sortir. En pratique C doit être largement inférieur à L pour limiter le phénomène d'arc-boutement. D'après nos expériences, le frottement par arc-boutement au niveau des seringues devient faible pour $I > 3H$, c'est-à-dire que la longueur du piston insérée minimale I dans la seringue doit être supérieure à trois fois sa hauteur. Ceci est valable pour des seringues en verre de différents volumes. Sachant que $L = I + C$ et que l'on choisit $I = 3H$ pour ne pas trop limiter le volume de travail on obtient :

$$M = \frac{L - 3H}{2} = \frac{99 - 3 \times 20}{2} = 19{,}5\ mm$$

Support à seringues

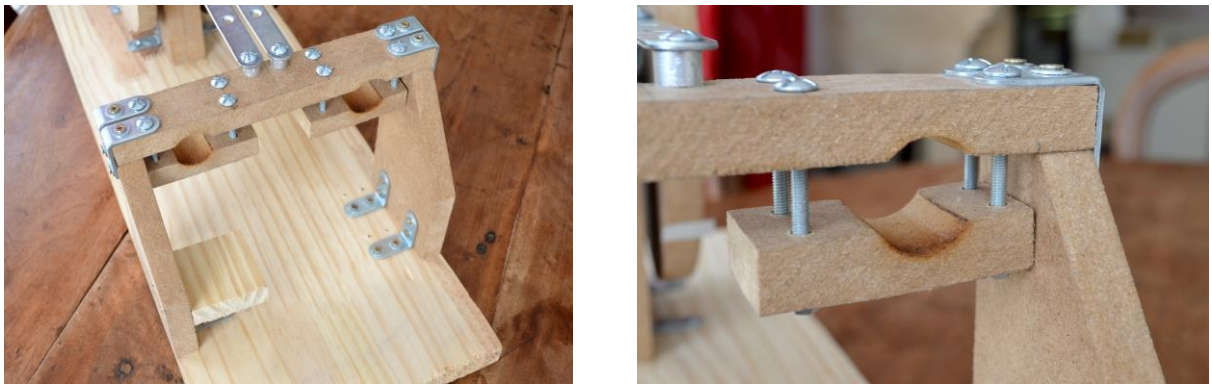


Figure 32 : support à seringues. Des vis permettent des serrer des seringues dans le bon plan

Le support à seringues sert à ternir les seringues à la bonne position. Il est composé d'un cadre solidement accroché au socle du moteur dans lequel quatre vis permettent de serrer chaque seringue. Ces vis sont au nombre de quatre car cela permet de modifier très légèrement la position des seringues dans deux dimensions (de haut en bas et de gauche à droite, *figure 32*) afin de s'assurer qu'elles ne contraignent pas les pistons. Pour que les seringues ne glissent pas d'avant en arrière quand le moteur tourne, des encoches permettent d'augmenter la surface de contact, ces encoches sont ajustées à la forme des seringues. La partie de chaque seringue en contact avec le support est également encerclée dans du caoutchouc de chambre à air. Le caoutchouc augmente l'adhérence entre le verre et le bois ce qui permet de ne pas avoir à serrer très fort les vis pour maintenir les seringues. Pour éviter que l'ensemble du support à seringues ne s'incline face aux pressions en jeu dans le moteur, des équerres droites permettent de le relier directement au support des volants d'inertie.

III) Essais et analyses

1) Le moteur Stirling en fonctionnement

a) Premier essai fonctionnel

Immédiatement après avoir terminé la fabrication de notre moteur Stirling, nous avons essayé de le faire tourner. Dans tous nos essais, l'une des seringues est chauffée par de l'alcool à brûler, l'autre est refroidie par convection naturelle.

Quelques secondes après avoir allumé le brûleur, nous avons déjà pu identifier un sens de rotation privilégié. Nous avons ensuite lancé le moteur à la main plusieurs fois. A chaque fois, le moteur tournait plus longtemps avant de s'arrêter. A un moment précis la tendance s'est inversée, le moteur a commencé à accélérer au lieu de ralentir et c'est avec le plus grand plaisir que nous avons pu le regarder fonctionner (*figure 33*) !

Nous avons ensuite pris quelques extraits vidéo du moteur qui nous ont permis de déterminer son régime maximal (nous avons obtenu un régime maximal de 340 tours par minutes après de nombreuses optimisations lors du tournage de la vidéo) :

$$\Omega = \frac{N_{tours}}{T_{sec}} \times 60 = \frac{17}{4{,}6} \times 60 = 222\ tr/min$$

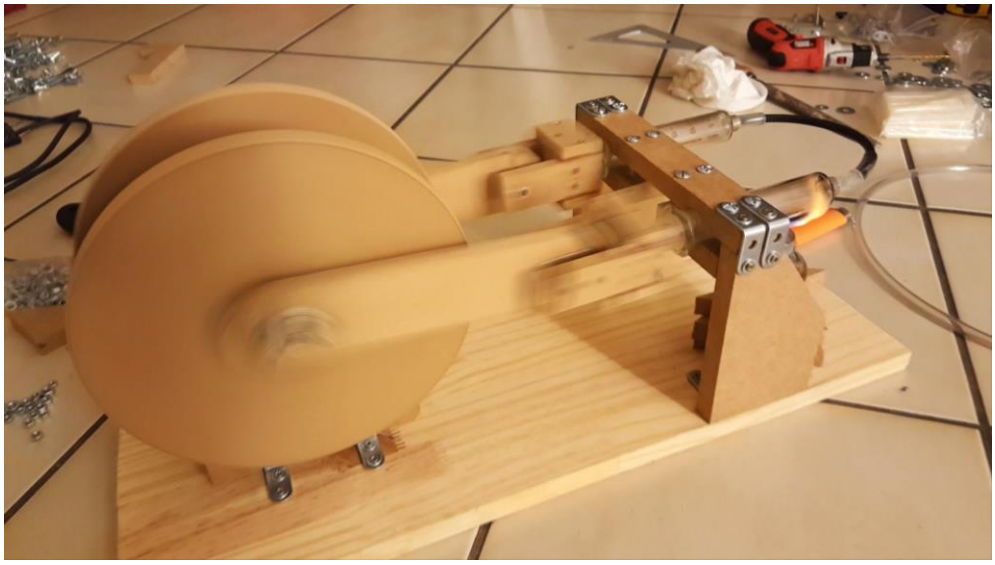


Figure 33 : moteur Stirling lors du premier essai fonctionnel

Nous avons ensuite tenté d'accroitre les performances du moteur. Nous avons d'abord essayé d'ajouter un régénérateur au moteur. Un régénérateur est un objet métallique situé dans le tuyau entre les deux pistons. Son enthalpie sensible permet, au sein de chaque cycle, de pré-réchauffer ou de pré-refroidir l'air afin d'accroître le rendement du moteur. Le régénérateur permet en effet au cycle thermodynamique de fournir autant de travail tout en consommant moins de chaleur. Il permet, en théorie, de passer du cycle de Stirling au cycle de Carnot qui est le cycle au plus haut rendement. Nous avons utilisé une longue tige en aluminium comme régénérateur afin d'accroitre la surface d'échange avec l'air. Une fois le régénérateur installé, nous avons fait tourner le moteur mais nous n'avons pas observé d'amélioration, la vitesse du moteur était plutôt inférieure à celle de l'essai précédent. Une explication possible est la trop faible surface de ce régénérateur. En effet, la surface d'un tube en métal, même s'il est long, est faible par rapport à celle d'une éponge métallique. D'autres essais réalisés plus tard avec une éponge métallique n'ont pas été plus concluants.

Afin d'augmenter la vitesse de rotation du moteur, nous avons aussi essayé de ne pas lubrifier ou de lubrifier d'avantage les seringues. Sans lubrifiant, le moteur fonctionne bien mais il a parfois tendance à rester coincé ce qui peut user localement les seringues. Avec une grande quantité de lubrifiant (c'est-à-dire environ 200 µL sur chaque piston ce qui reste très peu en volume) les performances du moteur sont fortement dégradées. Comme nous l'avons vu précédemment, les frottements au niveau des pistons déterminent presque entièrement les performances du moteur, la lubrification est donc un point sensible et nous n'avons pas trouvé de meilleure méthode que celle décrite dans la partie sur la résistance des seringues. D'ailleurs, lors de l'essai fortement lubrifié, nous avons rapidement cassé les deux seringues à cause d'une micro explosion qui s'est produite quand des vapeurs d'huile se sont enflammées spontanément.

b) Importance de la qualité des seringues

Les premières seringues en verre que nous avons utilisées proviennent des laboratoires de l'Université Paris 13, elles sont fabriquées en France et sont de haute qualité : le verre est épais, elles sont bien étanches et le piston glisse parfaitement dans le cylindre. Elles coûtent cependant environ 15 Euros l'unité ce qui est relativement cher.

Après avoir accidentellement cassé ces seringues, nous avons décidé d'en acheter d'autres sur un site d'achat en ligne à moindre coût. Ces seringues sont d'une qualité nettement inférieure et il est nettement plus délicat de faire tourner le moteur avec. Malgré plusieurs journées consacrées à changer les seringues, à les polir, à les lubrifier, à modifier leurs embouts, les résultats ont toujours été décevants (*figure 34*).

Néanmoins, nous avons appris de nombreuses choses en faisant ces expériences, notamment sur la résistance thermique des seringues.

Figure 34 : une petite partie de toutes les seringues utilisées…

2) Puissances et rendement

Dans cette partie, notre objectif sera de trouver une méthode nous permettant de déterminer la puissance de notre moteur Stirling α ainsi que son rendement. Les résultats seront donnés pour un régime de 222 tours par minute.

a) Détermination de la puissance du moteur

Pour connaître la puissance du moteur, nous vous déterminé la puissance qu'il faut pour le faire tourner à son régime maximal. En effet, en régime permanent, la vitesse du moteur est constante. Cela signifie que toute la puissance fournie par le cycle thermodynamique est perdue en chaleur par des frottements internes au moteur. Cette puissance s'appelle la puissance indiquée, elle est inférieure à la puissance utile mais va nous permettre de déterminer le travail fourni par chaque cycle du moteur. On a :

$$P_{indiquée} = P_{frott}$$

Dans le but de déterminer $P_{frott} = f(\Omega)$ nous avons réalisé une expérience dans laquelle nous entraînons le moteur Stirling avec une machine à courant continu (MCC). Nous ne pouvons cependant pas dire que la puissance motrice fournie par la MCC est égale à la puissance électrique qu'elle consomme. En effet, la MCC consomme de l'énergie pour s'entraîner elle-même, il convient donc de modéliser précisément la puissance mécanique délivrée par la MCC en fonction des paramètres mesurables. On peut écrire :

$$P_{frott} = P_{motrice} = P_{elec} - P_{balais} - P_{joule}$$

Sachant que dans une MCC la tension d'alimentation est égale à la force électromotrice plus la chute de tension en charge $U = E + R.I$ et que nous avons mesuré par l'expérience $R = 2{,}4\ \Omega$ il vient :

$$P_{motice} = U.I - E.I_{vide} - R.I^2$$

$$P_{motice} = U.I - (U - R.I_{vide}).I_{vide} - R.I^2$$

$$P_{motrice} = U(I - I_{vide}) + R(I_{vide}^2 - I^2)$$

Nous mesurons également la constante de vitesse du moteur $K = 97\ tr.min^{-1}.V^{-1}$ ce qui nous permet de prévoir que la vitesse de rotation de 222 tr/min sera atteinte pour une tension d'alimentation d'environ 8 V. Nous alimentions ensuite la MCC avec une tension comprise entre 0 et 14 V tout en entraînant le moteur Stirling au niveau d'un volant d'inertie est exerçant la pression la plus faible avant qu'il y ait glissement. Le tuyau qui relie les deux seringues est déconnecté de l'une pour ne pas créer une pompe à chaleur (réversibilité du moteur) tout en prenant en compte la perte de charge du tuyau (*figure 35*).

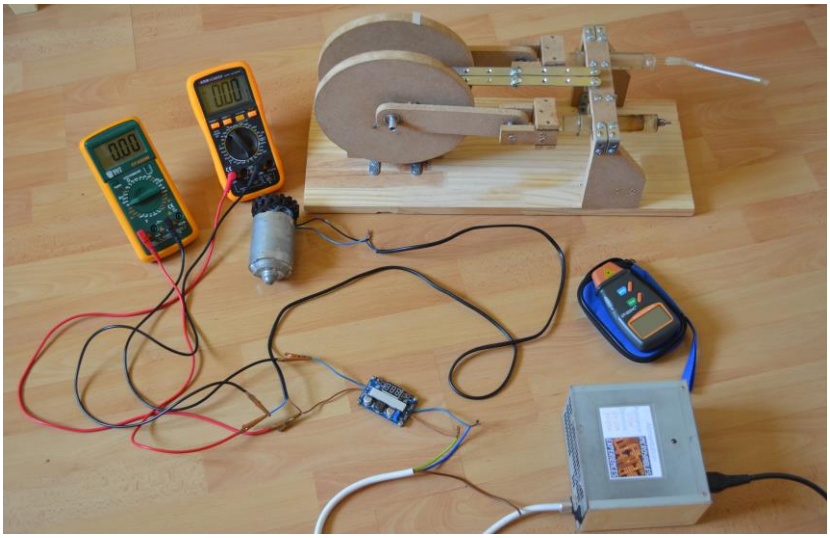


Figure 35 : dispositif expérimental avec voltmètre, ampèremètre et tachymètre

Nous obtenons le tableau suivant (*tableau 1*) :

$U\ (V)$	$I_{vide}\ (A)$	$I_{charge}(A)$	$\Omega\ (tr.min^{-1})$	$P_{mot}\ (W)$
0	0	0	0	0
3,6	0,11	0,25	80	0,38304
4,6	0,11	0,26	113	0,5568
6	0,12	0,28	150	0,8064
7	0,13	0,3	191	1,01456
8	0,13	0,3	224	1,18456
9	0,135	0,3	245	1,31274
10	0,14	0,305	270	1,47378
11	0,15	0,32	304	1,67824
12	0,15	0,315	327	1,79586
13	0,15	0,315	355	1,96086
14	0,15	0,315	387	2,12586

Tableau 1 : résultats des mesures expérimentales de tension, courant et vitesse de rotation

Nous remarquons que $P_{motrice}$ donc que P_{frott} semble augmenter linéairement avec Ω, nous traçons alors la courbe $P_{frott} = f(\Omega)$, *figure 36* :

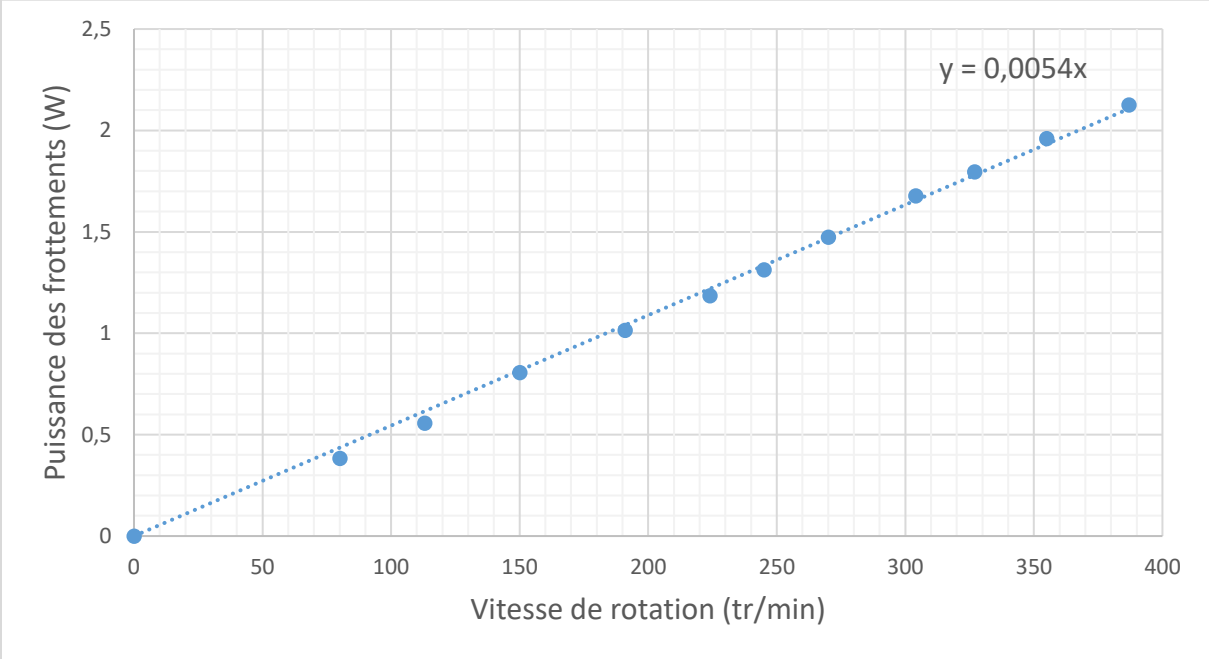


Figure 36 : puissance des forces de frottements en fonction de la vitesse de rotation du moteur

La puissance requise pour faire tourner le moteur Stirling est proportionnelle à sa vitesse de rotation. Le facteur de proportionnalité est $P_{frott} = 0{,}0054\ W.min.tr^{-1}$. P_{frott} Peut être décomposée en plusieurs facteurs, notamment les frottements au niveau des seringues, au niveau des volants d'inertie et au niveau du tuyau (perte de charge).

On a donc $P_{frott} = P_{frott\ seringues} + P_{frott\ volants} + P_{frott\ tuyau}$

En entraînant uniquement les volants d'inertie ou en supprimant le tuyau, la différence obtenue sur la valeur de P_{frott} est si faible que l'on ne peut pas la quantifier expérimentalement. On en déduit donc que $P_{frott\ volants}$ et $P_{frott\ tuyau}$ sont négligeables devant $P_{frott\ seringues}$.

Nous pouvons à présent calculer qu'à 222 trous par minute :

$$P_{indiquée} = P_{frott} = 0.0054 \times 222 = 1{,}2\ W$$

Cette puissance indiquée correspond réellement à la puissance produite par le cycle de notre moteur. Comme nous connaissons sa vitesse de rotation, nous pouvons en déduire le travail fourni par chaque cycle. Le moteur effectue un cycle par tour, nous avons donc :

$$W_{cycle} = \frac{P_{indiquée} \times 60}{\Omega} = \frac{1{,}2 \times 60}{222} = 0{,}324\ J/cycle$$

Ce travail peut être comparé à celui obtenu lors de la partie théorique du moteur Stirling α, *Figure 21,* de 0,65 J. Le travail obtenu en pratique est du même ordre de grandeur mais est moitié moindre. Nos hypothèses pour expliquer cette différence sont, par ordre de vraisemblance :

- La mesure de la puissance indiquée du moteur sous-estime probablement sa valeur car le frottement des seringues est plus élevé lorsque l'une d'entre elles est chaude et que la pression est plus élevée (tuyau raccordé).
- Le cycle théorique suppose que l'air est chauffé à 400 °C puis refroidit à 25 °C car ce sont les températures extrêmales mais rien ne prouve que l'intégralité ou une partie de l'air voit sa température monter à 400 °C côté et descendre à 25 °C côté froid (la température de la seringue froide finit par exemple par monter lorsque le moteur tourne).

b) Rendements

Nous cherchons maintenant à déterminer les différents rendements du moteur. Pour bien expliciter les différents rendements possibles, nous pouvons écrire la « cascade de rendements » suivante :

Le rendement organique est le rendement lié aux frottements mécaniques du moteur :

$$P_{utile} = P_{indiquée} \cdot \eta_{organique}$$

Le rendement de cycle est le rendement lié au second principe de la thermodynamique :

$$P_{indiquée} = P_{thermique} \cdot \eta_{cycle}$$

Le rendement thermique est le rendement lié au surplus de chaleur produit par le bruleur :

$$P_{thermique} = P_{combustion} \cdot \eta_{thermique}$$

Le rendement de combustion est le rendement lié à la combustion incomplète de l'alcool :

$$P_{combustion} = P_{chimique} \cdot \eta_{combustion}$$

On a donc :

$$P_{utile} = P_{chimique} \cdot \eta_{combustion} \cdot \eta_{thermique} \cdot \eta_{cycle} \cdot \eta_{organique}$$

Nous supposons que $\eta_{combustion} = 1$ car la combustion de l'alcool à brûler est presque complète. De plus, l'estimation de la puissance de combustion via la masse d'alcool brûlée est la méthode la plus précise. D'après les calculs réalisés en II-1-b la puissance de combustion s'élève à 241 W.

Nous supposons également que l'on ne cherche pas à déterminer le rendement par rapport à la puissance utile mais par rapport à la puissance indiquée car nous avons pu évaluer cette valeur précisément, $P_{indiquée} = 1{,}2\ W$.

La cascade de rendements devient alors :

$$P_{indiquée} = P_{combustion} \cdot \eta_{thermique} \cdot \eta_{cycle}$$

Nous pouvons définir un rendement global tel que $\eta_{global} = \eta_{thermique} \cdot \eta_{cycle}$ donc :

$$\eta_{global} = \frac{P_{indiquée}}{P_{combustion}} = \frac{1{,}2}{260} = 0{,}46\ \%$$

Ce rendement est très faible. Cela semble normal car notre moteur est petit, les pistons ne sont pas très étanches et nous n'avons pas utilisé de régénérateur au moment du test à plus haut régime. Pourtant, si l'on s'intéresse au détail des rendements, nous pouvons remarquer quelque chose d'intéressant :

Que vaut le rendement de cycle ? D'après nos calculs en II-1-c, même en prenant en compte un faible taux de compression lié au volume du tuyau, le rendement du cycle est toujours de l'ordre de $\eta_{cycle} = 0{,}2$ ce qui n'est pas si loin du rendement maximal du cycle de Carnot dans ces conditions $\eta_{carnot} = 0{,}56$. L'écart est conséquent mais il n'y a pas d'ordre de grandeur de

différence. En effet, le rendement de cycle ne prenant pas en compte les frottements du moteur ni le surplus de chaleur, il n'a aucune raison d'être très faible.

Nous pouvons donc en déduire approximativement $\eta_{thermique} = \frac{\eta_{global}}{\eta_{cycle}} = \frac{0{,}0056}{0{,}2} < 3\ \%$

Cette valeur signifie que moins de 3 % de la chaleur produite par la flamme d'alcool est utilisée par le cycle thermodynamique, le reste est perdu en chaleur au niveau de la seringue chaude (*figure 37*). Cette hypothèse peut se vérifier par la température d'équilibre de la seringue froide. Si le cycle thermodynamique avait un rendement très faible, alors une grande quantité de chaleur serait libéré par la seringue froide dont la température finirait par s'élever. Dans la pratique, on constate que la température de la seringue froide ne s'élève que de quelques degrés en régime permanent ce qui prouve qu'elle dissipe peu de chaleur et donc que le cycle en consomme peu également.

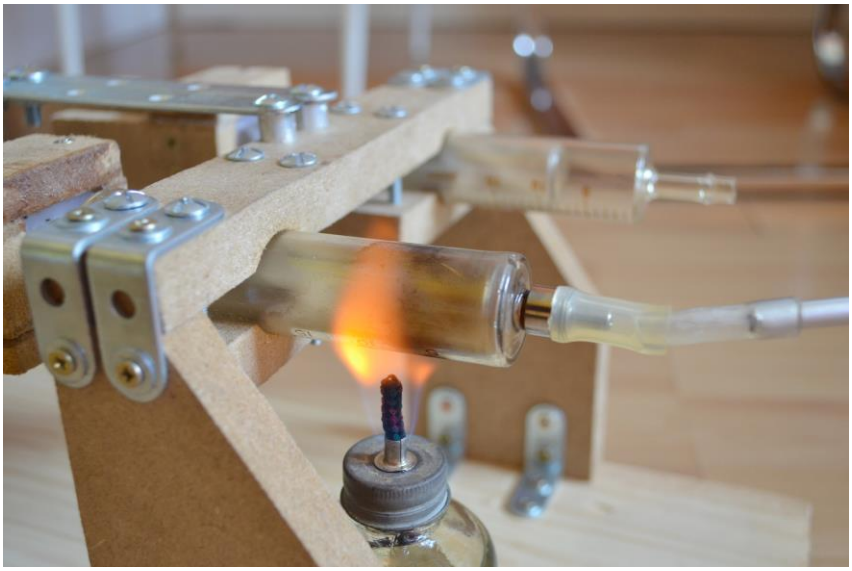


Figure 37 : la majorité du flux d'air chaud part au-dessus de la seringue

Ces mesures nous permettent donc d'affirmer que ce qui explique le faible rendement de notre moteur n'est pas uniquement son cycle mais surtout la grande quantité de chaleur qu'il faut pour maintenir l'ensemble de la seringue chaude à environ 400 °C. Le flux de chaleur en provenance du brûleur a un contact limité avec la seringue et la majorité de la chaleur s'élève au-dessus du moteur. Si l'on pouvait plonger la seringue chaude dans un milieu à 400 °C isolé de l'extérieur le rendement global du moteur sur la puissance indiquée ne serait plus de 0,46 % mais de l'ordre de 16 %.

Conclusion

Le moteur Stirling, bien que souvent présenté comme futuriste, a été inventé au début du XIXème siècle et est l'un des plus anciens moteurs thermiques. Il a connu des applications industrielles diverses et variées mais n'a jamais trouvé sa place en automobile, ne rivalisant qu'en très peu de points avec les moteurs à combustion interne. Son utilisation la plus courante se trouve dans le domaine de la production de froid, le moteur Stirling étant utilisé comme pompe à chaleur pour produire de l'air liquide.

Le moteur Stirling est cependant une fabuleuse curiosité thermodynamique qui attire de nombreux passionnés et représente un excellent outil pédagogique. Le dimensionnement complet d'un moteur Stirling est quelque chose de passionnant et il en va de même pour sa fabrication.

Une bonne compréhension du cycle thermodynamique d'un moteur Stirling permet de repérer les éléments importants pour optimiser ses performances comme maximiser la différence de température ou diminuer, mais pas trop, le volume mort. Cela permet également d'estimer la puissance du moteur ainsi que ses besoins en chaleur.

Ce qu'il y a de plus important dans la fabrication du moteur, c'est de choisir une conception modulaire, c'est-à-dire une conception dans laquelle chaque pièce peut être modifiée facilement, remplacée, réglée, le tout sans compromettre le reste du moteur.

Nous espérons que ce document vous a intéressé et qu'il vous aidera à fabriquer votre moteur Stirling. Armand & Victor, « Incroyables Expériences ».